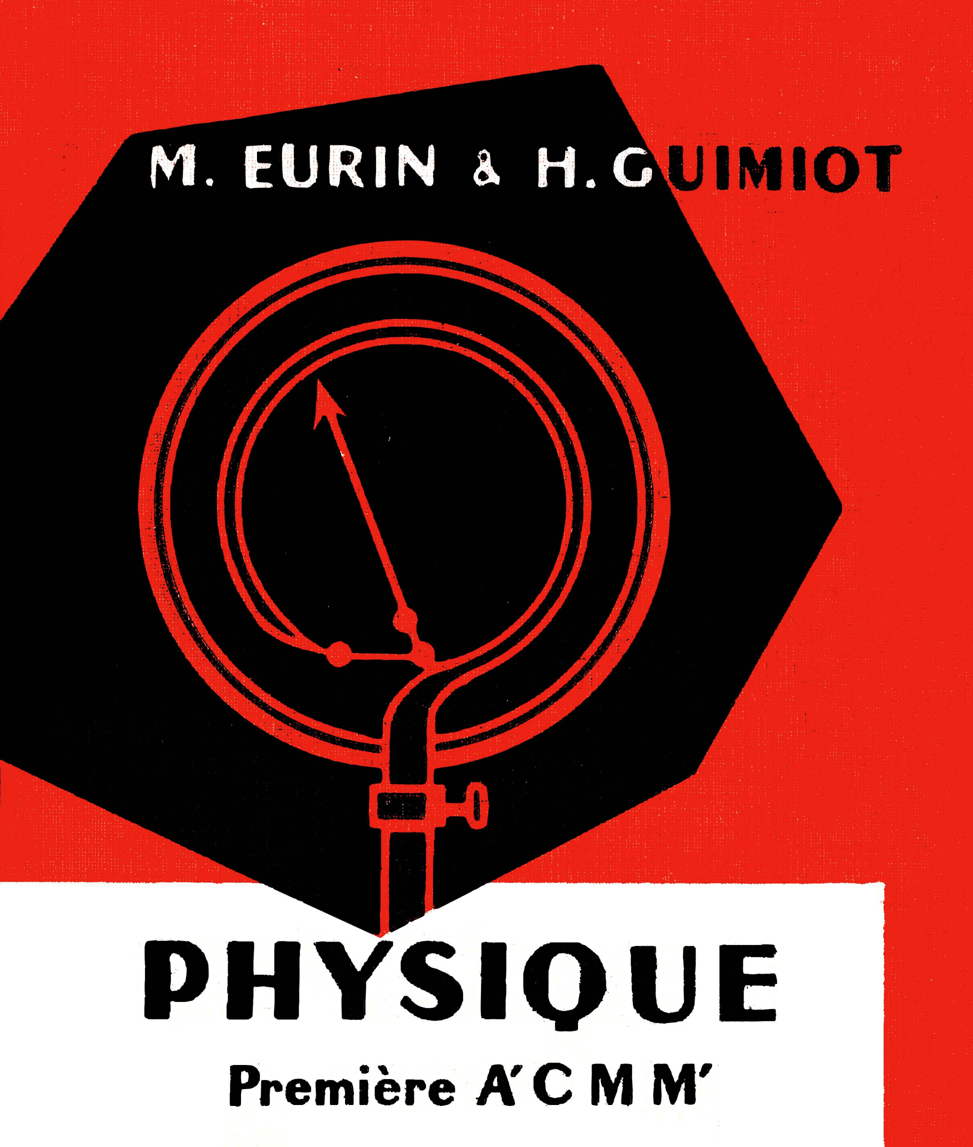
Programmes 1957



M. EURIN & H. GUIMIOT

PHYSIQUE

Première A'C M M'

HACHETTE

DES MÊMES AUTEURS

PHYSIQUE

Classes de Seconde AB. Un vol.
Classes de Seconde A'CC'MM'. Un vol.
Classes de Première AB. Un vol.
Cl. de Première A'CC'MM'. Un vol.
Classe de Mathématiques. Un vol.
Cl. de Sciences expérimentales. Un vol.

●

CHIMIE

Classes de Seconde AA'B. Un vol.
Classes de Seconde CC'MM'. Un vol.
Classes de Première AA'B. Un vol.
Classes de Première CC'MM'. Un vol.
Classes de Mathématiques et de Sciences expérimentales. Un vol.

●

SCIENCES PHYSIQUES

Classe de Philosophie. Un Volume.

COURS DE PHYSIQUE ET CHIMIE

MARCEL EURIN
Ancien élève
de l'École Normale Supérieure,
Professeur agrégé
au Lycée Charlemagne.

HENRI GUIMIOT
Ancien élève
de l'École Normale Supérieure,
Professeur agrégé
au Lycée Saint-Louis.

PHYSIQUE

AVEC 417 EXERCICES ET PROBLÈMES

CLASSES DE PREMIÈRE
CLASSIQUE A′ C C′
MODERNE M M′

NOUVELLE ÉDITION

entièrement revisée



PROGRAMMES OFFICIELS

CLASSE DE PREMIÈRE A′, C, C′, M, M′

Les alinéas marqués d'un astérisque* ne pourront faire l'objet d'une question de cours aux épreuves écrites du baccalauréat.

PHYSIQUE

ÉLECTRICITÉ. — Le courant continu défini par ses effets; sens du courant.

Étude qualitative de l'électrolyse.

*Expériences d'électrisation; les deux espèces d'électricité. Idée de la nature du courant électrique dans les conducteurs métalliques et dans les électrolytes.

Étude quantitative de l'électrolyse; quantité d'électricité; intensité du courant; coulomb; ampère; valeur en coulomb de la charge de l'électron.

*Exemples de transformation de la chaleur en travail et du travail en chaleur; le joule, unité de quantité de chaleur.

Chaleur dégagée dans un conducteur par le passage d'un courant; loi de Joule; résistance; ohm. Résistance d'un conducteur cylindrique homogène; variation de la résistance avec la température.

Applications de la loi de Joule : température d'équilibre d'un fil parcouru par un courant; chauffage; éclairage par incandescence.

*Générateurs, force électromotrice, volt. Récepteurs, force contre-électromotrice. Différence de potentiel entre deux points d'un circuit. Lois d'Ohm.

Répartition d'un courant entre plusieurs résistances montées en parallèles; résistance équivalente. Shunt. Emploi des voltmètres[1].

Expériences sur la polarisation des voltamètres; application aux accumulateurs; piles.

MAGNÉTISME. — Aimant défini par ses effets; masses magnétiques; Loi de Coulomb dans le vide ou dans l'air.

Champ magnétique au sens spatial; vecteur induction magnétique. Relation $\vec{f} = m\vec{B}$; spectre magnétique; champ d'induction uniforme. Action d'un champ d'induction uniforme sur un aimant : moment magnétique.

*Champ magnétique terrestre; composante horizontale; définition de la déclinaison.

ÉLECTROMAGNÉTISME. — Étude expérimentale du champ magnétique créé par un courant. Proportionnalité de l'induction à l'intensité du courant (dans le vide ou dans l'air). Solénoïde; expression approchée de l'induction à l'intérieur.

Action d'une induction uniforme sur un courant; loi de Laplace. Travail des forces électromagnétiques; flux d'induction; weber.

Induction électromagnétique.

*Expériences qualitatives sur l'aimantation du fer et de l'acier; existence des électroaimants.

Galvanomètre, ampèremètre, voltmètre à cadre mobile.

Action mutuelle de deux courants rectilignes parallèles; définition légale de l'ampère.

OPTIQUE. — Propagation rectiligne de la lumière.

Lois de la réflexion, miroirs plans.

Lois de la réfraction; réfraction limite; réflexion partielle et réflexion totale.

Images dans un dioptre plan.

*Marche d'un rayon à travers une lame à faces parallèles; cas d'une lame mince.

Déviation de la lumière par un prisme; dispersion de la lumière blanche.

Lentilles sphériques minces; marche des rayons; images; formules; convergence.

*Œil réduit du seul point de vue de l'accommodation.

Loupe; puissance, grossissement; expression de la puissance et du grossissement commercial.

Principe du microscope; puissance; grossissement commercial.

Principe de la lunette astronomique; grossissement.

1. Les mesures de résistance et de force électromotrice ne pourront être étudiées qu'en travaux pratiques.

PRÉFACE

LA nouvelle édition que nous présentons à nos Collègues suit exactement, tant par l'esprit que par la forme, les programmes de 1957.

• Ces programmes ont modifié l'ordre traditionnel : Optique, puis Électricité. C'est maintenant par l'Électricité que débute le cours de physique, et ce choix n'est pas arbitraire : il faut absolument pouvoir coordonner l'enseignement de la Chimie et celui de la Physique dans cette classe. Nous avions déjà souligné l'intérêt de ce parallélisme dans nos précédentes éditions.

• Le début du cours d'électricité est surtout caractérisé par l'introduction de notions sommaires d'électrostatique, qui permettront de mieux concrétiser la nature du courant électrique. C'est ainsi qu'après l'étude de l'électrolyse, il est possible de donner une première idée de la discontinuité de l'électricité, la charge élémentaire pouvant aisément se calculer d'après la théorie atomique. A propos des notions de différence de potentiel, de force électromotrice et de force contre-électromotrice, nous avons conservé le même plan que précédemment, en définissant d'abord la différence de potentiel qui nous paraît d'un accès plus facile, en ne faisant intervenir au départ que des résistances mortes.

• Les modifications les plus profondes se rencontrent dans l'étude du magnétisme et de l'électromagnétisme. Le programme substitue en effet au vecteur champ magnétique $\vec{H}$ le vecteur d'induction $\vec{B}$, ce qui correspond au choix des masses magnétiques ampériennes, et non coulombiennes, conformément à la relation $\vec{f} = \overrightarrow{mB}$; mais cette dernière remarque n'a que peu d'incidence sur le programme, sinon par son esprit, puisque les phénomènes ne sont étudiés quantitativement que dans le vide (ou dans l'air). Remarquons d'ailleurs que l'emploi du seul système d'unités M. K. S. A. soulagera les élèves de la question absolument fastidieuse de la pluralité des systèmes d'unités.

Nous nous sommes efforcés de simplifier le plus possible tous ces chapitres d'aspect nouveau. Cependant, l'étude qualitative de l'aimantation du fer ou de l'acier paraîtra peut-être un peu trop étoffée : nous sommes persuadés que ces notions très délicates doivent être suffisamment explicitées, sous peine de laisser subsister, dans l'esprit des élèves, trop d'idées inexactes, dont on se satisfait par paresse, mais qui deviennent dangereuses par la suite.

• Le cours d'Optique est assez réduit. Selon notre méthode habituelle, nous avons insisté sur la marche des rayons lumineux et sur celle des faisceaux; il faut que l'élève comprenne le phénomène, en faisant l'effort de s'y attacher, avant d'annoncer *on a la formule*, condition indispensable pour résoudre intelligemment les problèmes.

L'emploi de couleurs dans les figures aidera les élèves à mieux suivre le trajet des faisceaux lumineux. L'Optique dite géométrique n'est pas distincte de l'Optique physique; c'est pourquoi nous n'avons pas craint de faire appel à la nature ondulatoire du phénomène lumineux lorsque cet aspect pouvait apporter quelque simplification dans l'exposé. Nous souhaitons que les instruments d'optique soient mis entre les mains des élèves en travaux pratiques, chaque fois qu'il est possible. Nos élèves doivent observer dans l'instrument, réaliser une mise au point, se rendre compte de la délicatesse d'une telle opération avec le microscope, de la difficulté d'effectuer une visée avec une lunette de faible champ, etc.

• Nous avons été guidés par les mêmes considérations pédagogiques que pour les éditions précédentes : obliger nos élèves à réfléchir sur les phénomènes physiques, insister sur la définition des grandeurs, l'énoncé des lois. Nous avons tenu à faire suivre chaque définition ou chaque loi d'une application numérique immédiate; l'élève trouvera ainsi une méthode de résolution simple des exercices et il se rendra compte de l'ordre de grandeur des phénomènes. Ce dernier point nous paraît très important : que de réponses invraisemblables chacun de nous n'a-t-il pas entendues à propos du grossissement du microscope ou de l'intensité d'un courant!

• Le livre comprend **275 exercices** et **142 problèmes** qui, nous l'espérons, aideront nos candidats à bien se préparer à l'examen. Certains exercices sont suivis des réponses qui permettront aux élèves de contrôler eux-mêmes leur travail. De nombreux exercices et problèmes sont nouveaux. Nous avons adapté au programme quelques anciens problèmes donnés au baccalauréat.

Les paragraphes indiqués par le signe ◇ sont à la limite du programme; ils sont destinés aux bons élèves; ils ne peuvent faire l'objet de questions de cours au Baccalauréat.

Nous recevrons toujours avec gratitude les observations et critiques que l'usage de ce livre suggérera à nos collègues.

LES AUTEURS

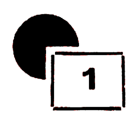
PHYSIQUE

I. ÉLECTRICITÉ

CHAPITRE PREMIER

LE COURANT ÉLECTRIQUE

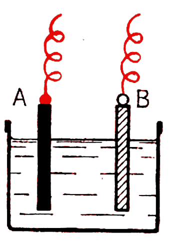
1. Les trois effets du courant électrique.
2. Quantité d'électricité et intensité d'un courant.

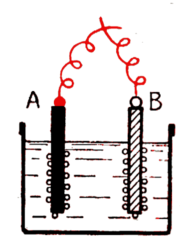


LES TROIS EFFETS DU COURANT ÉLECTRIQUE

■ **1. La pile de Volta.** — Au début de l'année 1800, le physicien italien Alexandre Volta (1745-1827) fit une découverte qui devait avoir des conséquences incalculables, celle de la *pile électrique* point de départ de toutes les études relatives au courant électrique.

Prenons (*fig. 1*) une cuve contenant de l'acide sulfurique et plongeons-y une plaque de cuivre A et une plaque de zinc amalgamé B, ne se touchant pas; l'acide sulfurique n'attaque ni le cuivre ni le zinc amalgamé, il ne se produit rien. Relions les deux plaques ou *électrodes* par un fil métallique extérieur : des bulles gazeuses apparaissent sur les électrodes; le phénomène cesse dès que l'on coupe le fil. Nous dirons que l'ensemble, acide sulfurique, zinc, cuivre, constitue une pile; que la décomposition chimique observée caractérise le passage d'un ***courant électrique*** dans le circuit fermé comprenant la pile précédente et le fil métallique extérieur. La pile de Volta est un ***générateur*** de courant électrique ou générateur d'électricité.



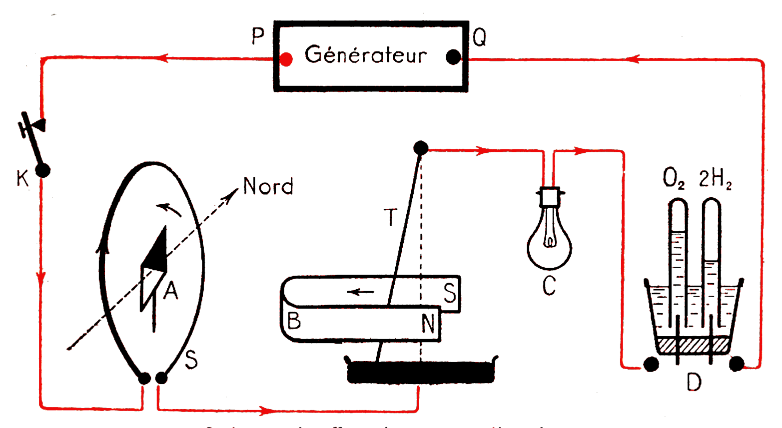


1. Pile de **Volta.**

■ **2. Conducteurs et isolants.** — Dans l'expérience précédente, le courant électrique traverse le fil métallique, le cuivre, le zinc, l'acide sulfurique; nous appellerons ces corps des *conducteurs*. Il en est ainsi des métaux, des alliages, des solutions d'acides, de bases et de sels.

Joignons les électrodes par une tige de verre, un bâton de soufre ou de bois : la décomposition chimique ne se produit pas, le courant ne passe pas. Le verre, le soufre, le bois sont des *isolants* ou *diélectriques*; tels sont encore l'air, l'eau pure, le pétrole, la paraffine, la porcelaine, l'ébonite, la bakélite, etc.

■ **3. Générateurs d'électricité.** — Il existe beaucoup d'autres générateurs d'électricité : piles et accumulateurs et des générateurs utilisant des phénomènes plus complexes tels qu'alternateurs et



2. Les trois effets du courant électrique.

dynamos. Tous possèdent deux *bornes* ou *pôles* tels qu'en les joignant à l'extérieur par un ensemble de conducteurs, on réalise un circuit fermé dont l'*ensemble* est parcouru par le courant électrique.

■ **4. Les trois effets du courant électrique.** — Relions les pôles P et Q d'un générateur par des conducteurs comprenant (*fig.* 2) un voltamètre à eau acidulée (cuve contenant de l'eau acidulée par l'acide sulfurique et dans laquelle plongent deux électrodes de platine), une petite lampe à incandescence, une tige T mobile entre les pôles marqués N et S (*voir* § *111*) d'un aimant en fer à cheval et trempant dans un bain de mercure, une bobine plate représentée par une seule spire dont le plan contient une aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical, enfin un interrupteur K. Si la tige de l'interrupteur K est soulevée, le circuit comprend un isolant et il ne se produit rien.

Fermons l'interrupteur K :

1° Un dégagement gazeux se produit sur les électrodes du voltamètre. On peut le caractériser : oxygène d'un côté, hydrogène de l'autre. Le phénomène est une *électrolyse*, la solution un électrolyte.

2° Le filament de la lampe s'échauffe et rougit : il y a *dégagement de chaleur*.

3° L'aiguille aimantée, d'abord dans le plan de la bobine, dévie; un aimant placé au voisinage d'un courant est soumis à des forces.

4° La tige T, d'abord verticale, se place obliquement; un conducteur parcouru par un courant et placé au voisinage d'un aimant est soumis à des forces.

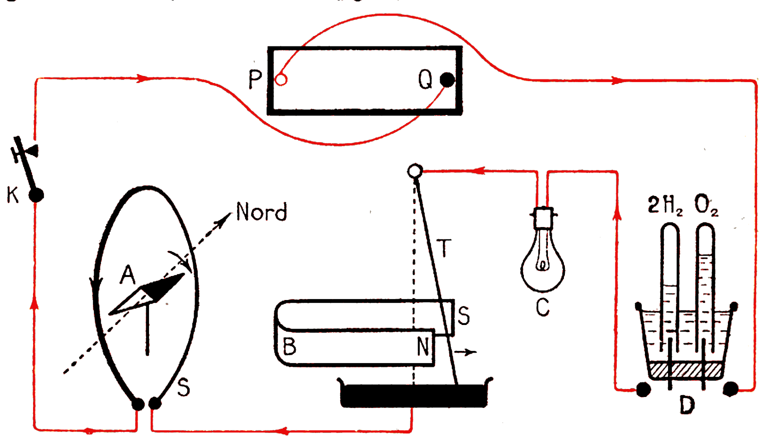
Ces deux derniers phénomènes constituent l'*effet magnétique du courant*.

▶ *Le passage d'un courant dans un circuit peut se manifester par l'un ou l'autre des trois effets suivants (ou l'un et l'autre) :*

effet chimique — effet calorifique — effet magnétique.

Les deux derniers effets existent toujours quel que soit le conducteur; le premier n'existe qu'avec certains conducteurs appelés électrolytes.

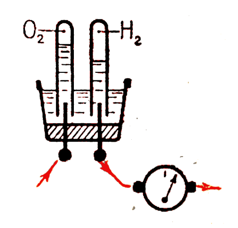
■ **5. Sens du courant.** — Débranchons les fils des bornes P et Q du générateur et permutons-les (*fig.* 3) : en fermant l'interrupteur K,



3. Les effets chimiques et magnétiques changent de sens lorsque l'on intervertit les pôles du générateur.

nous constatons que l'aiguille aimantée A et le fil T dévient en sens inverse de la première expérience, que les dégagements d'oxygène et d'hydrogène sont inversés. Par contre la lampe brille toujours de la même façon. Nous attribuerons ces inversions des phénomènes à *un changement de sens du courant* dû à une *dissymétrie des pôles du générateur*. Le choix du sens du courant est arbitraire. Nous admettrons la convention suivante (*fig.* 4) :

▶ ***Définition.*** *Le sens du courant électrique est celui qui va, dans un voltamètre à eau acidulée, de l'électrode où se dégage l'oxygène à celle où se dégage l'hydrogène.*



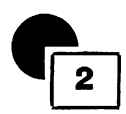
4. Sens du courant.

Cette définition permet de distinguer les deux pôles d'un générateur :

▶ **Définition.** *On appelle pôle positif d'un générateur le pôle de sortie du courant, c'est-à-dire celui qui est relié à l'électrode où se dégage de l'oxygène. L'autre pôle est appelé pôle négatif.*

Ces pôles sont, en général, indiqués par les signes + et —; souvent le pôle positif est marqué de rouge.

L'introduction d'un voltamètre dans un circuit n'est pas commode; aussi fait-on appel, pour déceler le passage d'un courant et indiquer son sens, à des appareils utilisant l'un ou l'autre des effets magnétiques : ce sont les *galvanomètres* et les *ampèremètres*.



QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ ET INTENSITÉ D'UN COURANT

■ **6. Quantité d'électricité.** — Réalisons par exemple l'électrolyse de l'eau acidulée. Nous recueillons de l'oxygène et de l'hydrogène. Nous admettons que ce phénomène est produit par le passage d'une certaine ***quantité d'électricité*** à travers le voltamètre, et le courant électrique nous apparaît ainsi comme un transport d'électricité à travers les conducteurs.

Il est naturel d'admettre que les volumes de gaz recueillis, le poids d'électrolyte décomposé, sont proportionnels à la quantité d'électricité qui a traversé le voltamètre.

▶ **Définition.** *La quantité d'électricité transportée par un courant électrique pendant un temps donné est proportionnelle au volume d'hydrogène recueilli dans l'électrolyse de l'eau acidulée.*

L'unité de quantité d'électricité est le ***coulomb***, qui sera définie au prochain chapitre. Nous verrons que 96 500 coulombs libèrent environ 11 200 cm^3 d'hydrogène mesurés dans les conditions normales.

■ **7. Intensité d'un courant.** — Une section d'un conducteur parcouru par un courant est traversée dans l'unité de temps par une quantité d'électricité plus ou moins grande : on dit que le courant est plus ou moins *intense*. Une électrolyse sera rapide avec un courant très intense, lente avec un courant peu intense. Nous appellerons ***intensité*** du courant son *débit* en quantité d'électricité.

▶ **Définition.** *L'unité pratique d'intensité de courant est l'**ampère** (symbole A); un courant d'intensité* 1 *ampère débite* 1 *coulomb en* 1 *seconde.*

Un courant de 2 ampères débitera 2 coulombs par seconde, 6 coulombs en 3 secondes, etc... On peut donc écrire la formule :



$$\underset{\text{coulomb}}{Q} = \underset{\text{ampère}}{I} \times \underset{\text{seconde}}{t}.$$

Reprenons le montage de la *figure* 2, et remplaçons le générateur par un autre, de façon que l'électrolyse se produise plus rapidement : le courant est plus intense; mais, en même temps, la lampe brille d'un éclat plus vif et dégage plus de chaleur; la déviation de l'aiguille aimantée s'accentue; la tige T est plus relevée. Nous voyons déjà que *les effets calorifiques et magnétiques du courant sont intimement liés à son intensité*. C'est ainsi que la *définition légale* de l'ampère, et par conséquent celle du coulomb (loi du 14 janvier 1948), repose sur les effets électromagnétiques et sera donnée au chapitre XVIII. L'intensité du courant est donc définie à partir de mesures électromagnétiques qui se sont révélées plus précises que les mesures électrochimiques.

¶ **Remarque :** L'admirable savant que fut *André-Marie Ampère* (1775-1836) établit en quelques jours les lois des propriétés magnétiques des courants. Il communiqua ses découvertes à l'Académie des Sciences en septembre-octobre 1820, employant pour la première fois le mot de courant électrique :

« *C'est cet état de l'électricité dans une série de corps électromoteurs et conducteurs que je nommerai, pour abréger,* **courant électrique**, *et, comme j'aurai sans cesse à parler de deux sens opposés....* »

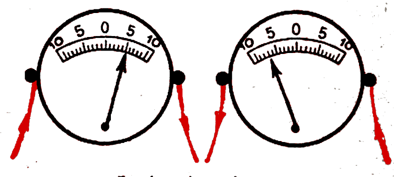
« *La direction du courant est celle que suit l'hydrogène... lorsque l'eau... fait partie du circuit et est décomposée par le courant.* » Il imagine ensuite le galvanomètre :

« *Je pense que... on doit lui donner le nom de* **galvanomètre**, *et qu'il convient de l'employer dans toutes les expériences sur les courants électriques, afin de voir à chaque instant si le courant a lieu....* »

Les intensités des courants usuels sont très variées. Une lampe à incandescence est traversée par un courant de l'ordre de 0,5 A; un moteur électrique ou une dynamo peuvent être parcourus par des courants d'une centaine d'ampères; un tube fluorescent ne consomme que quelques milliampères (*m*A), mais un fer à repasser 4 à 5 ampères.

■ **8. Ampèremètre.** — Un ampèremètre est souvent basé sur les effets magnétiques du courant. Il donne la valeur de l'intensité par simple lecture sur un cadran gradué devant lequel se déplace une aiguille.

Souvent la déviation de l'aiguille dépend du sens du courant; il est alors commode de placer le zéro de la graduation au milieu du cadran, comme le montre la *figure* 5.



5. Ampèremètre.
Le zéro de la graduation est ici au milieu.

■ **9. Ampère-heure.** — Pour les besoins industriels, on considère souvent une autre unité de *quantité* d'électricité, l'***ampère-heure.***

▶ ***Définition.*** *L'ampère-heure est la quantité d'électricité débitée par un courant de* 1 *ampère pendant* 1 *heure.*

L'ampère-heure vaut évidemment 3 600 coulombs et la formule précédente devient :

Q	$=$	I	$\times$	$t.$
ampère-heure		ampère		heure

● EXEMPLE. — *Une pile débite un courant de 0,1 ampère. Quelle est la quantité d'électricité qui a traversé le circuit en 1/4 heure?*

En 1 quart d'heure, il y a : **60 × 15 = 900** secondes,

d'où $Q = 0{,}1 \times 900 = 90$ **coulombs,**

ou encore $Q = 0{,}1 \cdot \frac{1}{4} = 0{,}025$ **ampère-heure.**

■ **10. Conservation de l'intensité.** — Reprenons le circuit de la *figure* 2, que nous pouvons même compliquer en y ajoutant un autre générateur, un moteur, d'autres lampes, etc.... Intercalons en plusieurs endroits des voltamètres à eau acidulée. Nous observons que partout on obtient pendant le même temps un même volume d'hydrogène dégagé. Pendant le même temps, il est passé en chaque point une même quantité d'électricité; en ces points l'intensité du courant est toujours la même; il n'y a eu nulle part accumulation de charges électriques.

▶ *En tous les points d'un conducteur ou d'une série d'appareils conducteurs, l'intensité du courant est la même à chaque instant.*

Cette intensité se maintient en général fixe au cours d'une expérience; le courant est dit *continu*.

◀ RÉSUMÉ ▶

Deux plaques, l'une de zinc, l'autre de cuivre, plongées dans une solution sulfurique constituent ***une pile,*** *appelée pile de Volta. En réunissant les plaques par un fil extérieur, l'ensemble est traversé par un* ***courant électrique.*** *Les* ***conducteurs*** *laissent passer le courant; tels sont les métaux et les alliages. Les* ***isolants*** *s'opposent à son passage : l'air, le bois, le soufre, l'ébonite.*

Le courant électrique se manifeste par ***trois effets : décomposition chimique*** *de certains corps dissous (acides, bases, sels) appelés électrolytes —* ***dégagement de chaleur*** *dans les conducteurs —* ***effets magnétiques*** *en son voisinage.*

L'unité de ***quantité d'électricité*** *est le* ***coulomb.***

*L'****intensité*** *d'un courant mesure son débit en quantité d'électricité par unité de temps. L'unité d'intensité est l'****ampère,*** *qui correspond au passage d'un coulomb en une seconde à travers une section donnée.*

Un courant d'intensité I ampères débite en t secondes une quantité d'électricité :

Q	=	I	×	t.
coulomb		ampère		seconde

*On utilise aussi l'****ampère-heure*** *qui vaut 3 600 coulombs.*

En chaque point d'un conducteur, ou d'une série de conducteurs, l'intensité du courant est la même.

★ EXERCICES ★

1. — Une quantité d'électricité de 0,1 ampère-heure est débitée en 10 minutes; quelle est l'intensité du courant? — **Rép.** : *0,6 ampère.*

2. — Un courant de 1 ampère fait dégager 1 $\overline{cm}^3$ d'oxygène pendant un certain temps, dans un voltamètre à eau acidulée. Quelle est l'intensité du courant qui pendant un temps moitié ferait dégager 3 $\overline{cm}^3$ d'oxygène? — **Rép.** : *6 ampères.*

3. — Un courant de 1 micro-ampère (10^{-6} ampère) passe pendant 24 heures; quelle est la quantité d'électricité transportée pendant ce temps?

4. — Une batterie d'accumulateurs peut fournir 90 ampères-heure. Elle est déchargée au bout de 10 heures. Quelle intensité moyenne de courant a-t-elle fourni? — **Rép.** : *9 ampères.*

5. — Une lampe à incandescence alimentée par une batterie d'accumulateurs est parcourue par un courant de 0,25 ampère. Elle fonctionne 2 heures par jour. Calculer en coulombs et en ampères-heure la quantité d'électricité qui la traverse journellement.



Photo Hachette.

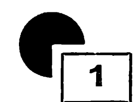
Volta (1745-1827).

B. N. Estampes.

CHAPITRE II

✶ NOTIONS D'ÉLECTROSTATIQUE

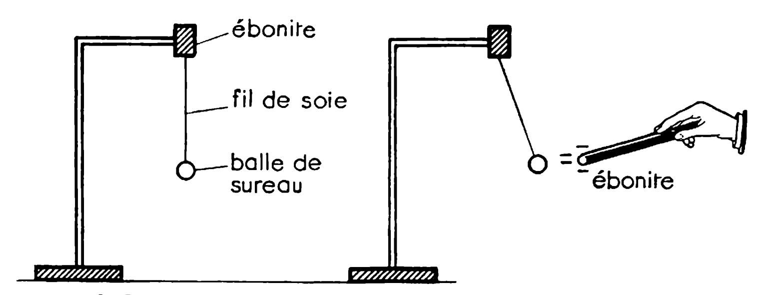
1. Les deux espèces d'électricité.
2. Nature du courant électrique.



LES DEUX ESPÈCES D'ÉLECTRICITÉ

■ **11. Électrisation par frottement.** — Le nom *électricité* provient du mot grec *elektron* qui désignait une substance naturelle que nous appelons *ambre*; c'est que, dès la plus haute antiquité, on avait remarqué que l'ambre, frotté avec de la laine, possède la propriété d'attirer les corps légers tels que morceaux de crin, balles de moelle de sureau, etc.... Cette propriété fut attribuée à un état particulier de la matière : l'*électrisation*, dont la cause était le développement de l'*électricité* sur sa substance.

Nous pouvons répéter cette expérience avec un bâton de résine ou un bâton d'ébonite : il suffit de les frotter avec du drap, ou mieux avec une peau de chat, et de les approcher d'une balle de moelle de



6. Attraction d'un pendule léger par un corps électrisé.

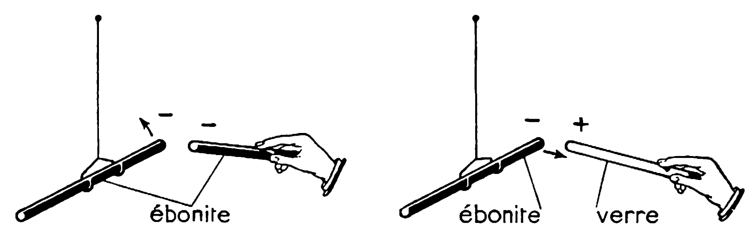
sureau, suspendue à un fil de soie, pour constater une vive attraction de la balle (*fig. 6*).

Le même résultat peut être obtenu avec n'importe quel solide *isolant* comme le verre, le soufre, la paraffine, le plexiglass.... Mais l'attraction ne se manifeste que si on approche de la boule de sureau la partie du bâton qui a été frottée. L'électrisation d'un isolant est donc un phénomène localisé.

▶ *On peut électriser un isolant par frottement sur un autre isolant (drap, peau de chat). L'électricité ainsi développée est localisée à l'endroit frotté.*

■ **12. Forces de répulsion et d'attraction entre corps électrisés.** — Étudions les actions de deux corps électrisés l'un sur l'autre. Prenons deux bâtons d'ébonite et frottons l'une de leurs extrémités avec une peau de chat; ils sont naturellement électrisés de la même façon. Suspendons l'un d'eux à un fil de soie par l'intermédiaire d'un étrier (*fig.* 7) et approchons l'autre : nous constatons qu'il y a ***répulsion*** du bâton rendu mobile.

La même expérience faite avec deux bâtons de verre électrisés par



7. Répulsion et attraction entre corps électrisés.

frottement conduit au même résultat : les deux bâtons de verre électrisés par frottement se repoussent.

Approchons maintenant un bâton de verre électrisé par frottement d'un bâton d'ébonite électrisé par frottement : le bâton d'ébonite est ***attiré*** par le bâton de verre.

▶ *Il s'exerce entre deux corps électrisés des forces d'attraction ou de répulsion.*

■ **13. Les deux espèces d'électricité.** — Pour interpréter la possibilité d'observer des forces attractives et répulsives entre corps électrisés, nous admettrons l'existence de deux espèces d'électricité : on les a appelées primitivement l'*électricité vitreuse* (développée sur le verre) et l'*électricité résineuse* (développée sur la résine, l'ébonite...). Actuellement on les désigne sous le nom d'***électricité positive*** (vitreuse) et ***négative*** (résineuse). Remarquons l'arbitraire total de ces deux qualificatifs.

La répulsion de deux bâtons d'ébonite ou de deux bâtons de verre électrisés conduit à énoncer la loi suivante :

▶ *Deux corps chargés d'électricité de même signe se repoussent.*

De même l'attraction de l'ébonite électrisée par le verre électrisé permet d'affirmer :

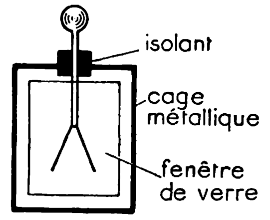
▶ *Deux corps chargés d'électricité de signes contraires s'attirent.*

■ **14. Électrisation des corps conducteurs.** — Un morceau de cuivre, *tenu à la main* et frotté avec une peau de chat, ne manifeste aucun signe d'électrisation : il n'attire pas le pendule de sureau. Par contre, si nous tenons ce morceau de métal par l'intermédiaire d'une tige de verre, et si nous frottons le cuivre, nous constatons facilement qu'il est électrisé, et que cet état d'électrisation se manifeste en tous points du métal, même en des points très éloignés des endroits frottés.

Nous interpréterons ces faits en admettant que l'électricité développée sur un conducteur se répand de suite sur toute sa surface, contrairement à ce qui se passe pour un isolant pour lequel l'électricité reste aux points où elle a été produite. Mais d'où vient l'échec de notre première tentative? Nous l'expliquerons en supposant que notre corps est lui-même suffisamment conducteur pour transmettre l'électricité au sol; l'électricité ainsi répartie est alors trop faible pour se manifester.

L'importance de ces expériences n'échappera pas : nous retrouvons ici la différence entre *conducteurs* et *isolants* : l'électricité peut se déplacer dans un conducteur; elle reste immobile dans un isolant.

■ **15. Un appareil très sensible : l'électroscope à feuilles d'or.** — Le pendule électrique constitué par une balle de sureau n'est pas un instrument très sensible et, pour déceler des états de faible électrisation, on utilise souvent un autre appareil : l'*électroscope à feuilles d'or*. Il est constitué (*fig. 8*) par une tige métallique à l'extrémité inférieure de laquelle se trouvent deux feuilles d'or (ou d'aluminium) très minces; une sphère ou un plateau sont fixés à l'extrémité supérieure, et l'ensemble est enfermé dans une cage de métal comportant deux fenêtres de verre, mais isolé de cette cage.



8. Électroscope à feuilles d'or.

Frottons avec une peau de chat la sphère de l'électroscope : les feuilles d'or divergent : le conducteur a été électrisé et les feuilles chargées d'électricité de même signe se repoussent, d'où leur divergence.

■ **16. Autres modes d'électrisation.** — Approchons d'un électroscope *neutre* (non électrisé) un bâton d'ébonite électrisé, sans qu'il y ait contact : nous constatons une divergence des feuilles, ce qui dénote une électrisation à distance, due à la seule présence du bâton électrisé.

On dit qu'il y a eu ***électrisation par influence.***

Éloignons le bâton d'ébonite : les feuilles retombent indiquant que le corps revient à l'état neutre. L'électrisation par influence est un

phénomène très complexe que nous nous devons de signaler, car il est observé très fréquemment.

Touchons une balle de sureau enduite de plombagine avec un bâton d'ébonite électrisé : la balle est de suite repoussée, ce qui indique qu'elle s'est chargée d'*électricité de même signe* que le bâton d'ébonite. Il y a eu ***électrisation par contact.***

On connaît encore beaucoup d'autres modes d'électrisation : développement d'électricité négative par l'action de la lumière sur une plaque de zinc bien décapée et reliée à un électroscope : c'est l'***effet photoélectrique.*** Toute substance chauffée émet de l'électricité négative et rend l'air conducteur dans son voisinage : c'est l'***émission thermoélectronique.*** Le corps qui émet ainsi de l'électricité négative se charge d'électricité positive. Citons enfin le phénomène de ***piézoélectricité*** : apparition des deux espèces d'électricité sur les faces d'une lame de quartz convenablement taillée et soumise à une compression ou à une traction.

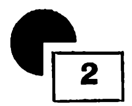
■ **17. Générateurs électrostatiques.** — On sait construire des générateurs électrostatiques utilisant les phénomènes d'électrisation par frottements ou par influence et capables de débiter des courants électriques de quelques milliampères dans un circuit convenable reliant leurs deux pôles.

Prenons un tel générateur et relions ses pôles à deux plateaux métalliques isolés du sol par des supports en verre (*fig.* 9). Une balle de sureau chargée d'électricité négative et placée entre les plateaux est alors attirée par l'un d'eux, repoussée par l'autre, ce qui prouve que ces plateaux possèdent des charges de signes contraires. On peut alors constater que *le plateau positif est bien celui qui est relié au pôle positif du générateur,* défini dans la première leçon.

9. Attractions et répulsions
par des plateaux reliés à un générateur.

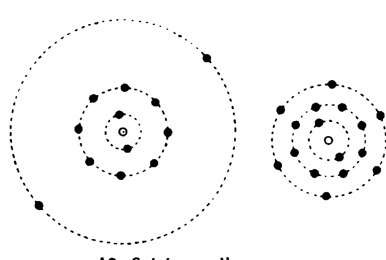
Quand nous avons admis qu'un courant allait dans le circuit extérieur du pôle positif au pôle négatif, cela revenait donc à admettre qu'*un courant électrique était un courant d'électricité positive.*

Si, dans l'expérience précédente, la balle vient à toucher le plateau positif, elle se charge d'électricité positive. Elle est alors violemment repoussée jusqu'au plateau négatif sur lequel elle se décharge, puis effectue ainsi des oscillations d'un plateau à l'autre. A chaque oscillation elle transporte une charge; il y a un courant électrique (transport de charge) qui passe d'un plateau à l'autre.



NATURE DU COURANT ÉLECTRIQUE

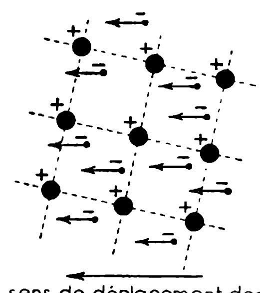
■ **18. L'atome.** — Toutes les expériences précédentes nous ont montré que, sous des influences très variées, tous les corps pouvaient libérer de l'électricité positive et de l'électricité négative. On est donc conduit à admettre que l'électricité est contenue dans la matière elle-même, donc dans la particule élémentaire la plus petite, l'atome.



10. Schémas d'atomes.
Magnésium. Soufre.

Une étude plus complète nous montrera plus tard qu'un atome est un édifice complexe. Il est formé de deux parties : un ***noyau*** très petit chargé d'électricité positive, possédant la quasi-totalité de la masse de l'atome et un ensemble de corpuscules d'électricité négative gravitant autour du noyau : ce sont des ***électrons*** ou ***négatons*** (*fig. 10*). Pour nous faire une idée des dimensions respectives de l'atome et du noyau, prenons le plus simple des atomes, celui de l'hydrogène : si nous schématisons son noyau par une sphère de un mètre de diamètre placée sur l'Obélisque de la place de la Concorde, le seul électron de cet atome décrirait une orbite passant par la forêt de Fontainebleau, orbite de 50 km de rayon!

■ **19. Le courant électrique dans les métaux.** — Les atomes renfermant des corpuscules d'électricité positive et négative, comment peut-on interpréter le passage du courant électrique dans un conducteur? Nous n'envisagerons que le cas simple d'un métal. Dans ce cas, certains électrons, appelés électrons de conduction ou de valence (voir Cours de Chimie), sont pratiquement libres et peuvent se mettre en mouvement sous l'action d'un générateur ou électromoteur. *Ce mouvement de charges négatives constitue en fait le courant électrique.* Ce mouvement a lieu en sens inverse de celui du sens arbitrairement choisi par Ampère (*fig. 11*) car il revient au même de dire que l'on transporte de l'électricité positive dans un sens ou de l'électricité négative dans l'autre.



11. Courant d'électrons dans un conducteur.

▶ *Dans un conducteur métallique, le courant électrique est dû à un déplacement d'électrons en sens inverse du sens choisi pour le passage du courant.*

La vitesse de déplacement des électrons dans un métal est faible, *de l'ordre de 0,1 millimètre par seconde.*

Le passage du courant dans un électrolyte sera étudié en détail avec la dissociation ionique au § 24.

Dans les isolants, les électrons sont au contraire assez fortement liés au noyau, et ne peuvent pas se déplacer : le courant électrique ne passe pas.

¶ **Remarques** : 1. Il existe toute une catégorie de substances appelées des *semi-conducteurs* pour lesquelles le passage du courant est complexe; nous ne pouvons insister ici.

2. L'effet magnétique du courant a pu être observé en faisant tourner rapidement un disque isolant chargé d'électricité : ici l'électricité ne se meut pas dans la matière, mais est entraînée par elle. Ces expériences faites par Rowland en 1876 justifient notre hypothèse : le courant électrique est bien dû à un mouvement de charges électriques.

■ **20. Interprétation des phénomènes d'électrisation.** — Les phénomènes d'électrisation s'interprètent de la façon suivante. Un corps est électriquement neutre si la somme des charges des noyaux est égale à la somme des charges des électrons. C'est le cas d'un atome.

Charger un corps positivement, c'est lui enlever des électrons; ce fait se produit par frottement du verre avec du drap. Le drap prend des électrons au verre : le verre se charge positivement, le drap négativement.

Charger un corps négativement, c'est lui céder des électrons : la peau de chat cède des électrons à l'ébonite.

Dans tous les cas, ce sont les électrons qui participent aux phénomènes d'électrisation ou de passage du courant; les noyaux positifs n'entrent jamais en jeu.

◀ RÉSUMÉ ▶

Un isolant, frotté avec du drap ou une peau de chat possède la propriété d'attirer des corps légers : on dit qu'il est ***électrisé.*** *Cette électrisation ne se manifeste qu'à l'endroit frotté.*

Des corps électrisés exercent les uns sur les autres des forces attractives ou répulsives, ce qui a conduit à distinguer ***deux sortes d'électricité :*** *l'électricité* ***positive*** *et l'électricité* ***négative.*** *Deux corps chargés d'électricité de même signe se repoussent; deux corps chargés d'électricité de signes contraires s'attirent.*

Les corps conducteurs peuvent être aussi électrisés par frottement lorsqu'ils sont tenus par l'intermédiaire d'un isolant; l'électrisation se manifeste alors en tous leurs points.

On peut électriser un corps par influence, par contact. Sous l'action de la lumière certains métaux émettent de l'électricité négative; il en est de même de toute substance chauffée.

Les atomes sont constitués de noyaux chargés d'électricité positive et d'électrons, corpuscules d'électricité négative. Dans un métal, certains de ces électrons sont libres de se déplacer; le courant électrique est alors dû à un mouvement d'électrons qui se propagent en sens inverse du sens arbitrairement choisi comme sens du courant.

Les phénomènes d'électrisation correspondent à des échanges d'électrons : le corps qui perd des électrons est électrisé positivement, celui qui en reçoit est électrisé négativement.

CHAPITRE III

ÉLECTROLYSE

1. * La dissociation ionique.
2. Lois qualitatives.
3. Lois quantitatives.
4. Applications.



*LA DISSOCIATION IONIQUE

■ **21. Les électrolytes.** — Nous avons, dans notre première leçon, indiqué que le passage du courant dans certains liquides s'accompagnait de l'apparition aux électrodes de phénomènes chimiques : dégagements gazeux d'hydrogène et d'oxygène, par exemple, et nous avons appelé ce phénomène une ***électrolyse*** (décomposition par le courant électrique).

La substance qui subit une telle décomposition est appelée un ***électrolyte.*** Les *acides*, les *bases* et les *sels* en solution dans l'eau sont les plus importants de tous les électrolytes. Ce sont les seuls dont nous parlerons.

■ **22. Dissociation ionique. Hypothèse d'Arrhénius.** — Prenons du chlorure d'hydrogène ou *gaz chlorhydrique* et liquéfions-le : le liquide obtenu ne conduit pas le courant. L'eau parfaitement pure n'est pratiquement pas conductrice, et une lampe placée dans un circuit comprenant un voltamètre ne contenant que de l'eau distillée ne brille pas; un milliampèremètre dévie à peine. Versons dans ce voltamètre quelques centimètres cube d'une solution de gaz chlorhydrique : nous voyons la lampe (convenablement choisie) briller, et le milliampèremètre dévier notablement. La solution chlorhydrique est conductrice et il apparaît à l'anode du chlore et à la cathode de l'hydrogène (gaz faciles à caractériser).

Pour interpréter cette différence de propriétés entre le *liquide chlorhydrique* et la *solution aqueuse* de gaz chlorhydrique, il est naturel d'admettre qu'il s'est produit une modification de la molécule de gaz chlorhydrique au moment de la dissolution dans l'eau. C'est ce que fit le savant suédois *Svante Arrhénius* (1859-1927) en proposant en 1887 une hypothèse hardie : la *Théorie des ions*, dont les vérifications ont été si

nombreuses qu'on doit considérer cette théorie comme une réalité expérimentale.

Les hypothèses essentielles sont les suivantes :

1° *Tout électrolyte en solution est décomposé en deux parties appelées* ***ions.*** Cette dissociation ionique se produit dès la dissolution et indépendamment du passage du courant. Elle est *partielle* ou *totale* selon la nature de l'électrolyte.

Ainsi la molécule HCl n'existe plus dans la solution chlorhydrique; il y a deux ions, l'ion chlorure et l'ion hydrogène.

2° *Chaque ion est chargé d'électricité positive ou négative.* Il faut donc distinguer deux sortes d'ions :

— les ***anions,*** qui vont à l'anode lors d'une électrolyse, d'où leur nom, sont chargés d'*électricité négative*. C'est le cas de l'*anion chlorure* : $\mathbf{Cl^-}$;

— les ***cations,*** qui vont à la cathode, sont chargés d'*électricité positive* : par exemple, le cation hydrogène $\mathbf{H^+}$, le cation sodium $\mathbf{Na^+}$.

D'une façon tout à fait générale, en se limitant aux solutions d'acides, de bases et de sels dans l'eau, les cations sont constitués par le *métal* ou *l'hydrogène* chargés positivement; les anions sont formés par le reste de la molécule, et chargés négativement. On a ainsi les modèles suivants de dissociation ionique :

$$\begin{array}{lll} \text{acide} & HA & \longrightarrow H^+ + A^- \\ \text{base} & MOH & \longrightarrow M^+ + OH^- \\ \text{sel} & MA & \longrightarrow M^+ + A^- \end{array}$$

■ **23. Charge des ions.** — Les ions chlorure Cl^-, hydrogène H^+, sodium Na^+, oxhydrile OH^-, provenant de corps électriquement neutres HCl, NaCl, NaOH portent la même charge en valeur absolue. Mais prenons le chlorure de zinc $ZnCl_2$: mis en solution dans l'eau, il se dissociera en donnant deux ions chlorure Cl^- et un ion zinc qui, pour respecter la neutralité de l'édifice $ZnCl_2$, devra avoir une charge positive double de celle de l'ion chlorure Cl^-; nous le représenterons par Zn^{++}.

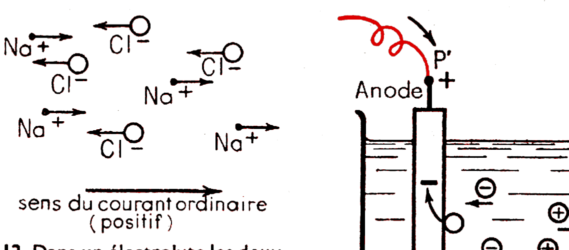
Le nombre de charges ainsi portées par les ions est égal à la ***valence électrolytique*** de l'ion.

On peut avoir des *ions simples* ou *monoatomiques* formés par un seul atome (Cl^-, H^+, Ca^{++}...) ou des *ions complexes* ou *polyatomiques* formés par un édifice d'atomes

$$(NH_4^+,\ SO_4^{--},\ NO_3^-,\ \ldots).$$

¶ **Remarque :** Les charges électriques des ions proviennent des échanges d'électrons entre les atomes ou édifices d'atomes. Ainsi, dans le cas de la molécule HCl, la formation des ions H^+ et Cl^- s'explique en admettant que l'atome d'hydrogène cède un électron à l'atome de chlore qui se charge ainsi négativement tandis que l'atome d'hydrogène se charge positivement par défaut d'électron.

■ **24. Le passage du courant dans un électrolyte.** — Le mécanisme du passage du courant dans un électrolyte est très différent de celui qui correspond aux conducteurs métalliques. Quand nous réunissons deux plaques métalliques aux deux pôles d'un générateur, nous avons vérifié (§ 17) que l'une des plaques se chargeait d'électricité



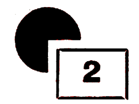
12. Dans un électrolyte les deux sortes d'**ions** se déplacent.

13. Triage électrolytique des ions.

positive et l'autre d'électricité négative. Si nous plongeons ces plaques dans une solution aqueuse d'électrolyte la première (*anode*) attirera les ions négatifs et la deuxième (*cathode*) attirera les ions positifs. Il y a donc un double courant d'ions en sens inverses (*fig. 12* et *13*).

A l'anode, les ions négatifs perdent des électrons tandis qu'à la cathode les ions positifs reçoivent des électrons (*fig. 13*). Tout se passe donc comme si des électrons étaient transportés de la cathode à l'anode : le courant électrique, dont le sens est le sens contraire de celui du courant d'électrons, est bien passé de l'anode à la cathode à l'intérieur de l'électrolyte.

Remarquons que ce passage du courant constitue en même temps un véritable ***triage électrolytique*** des ions.

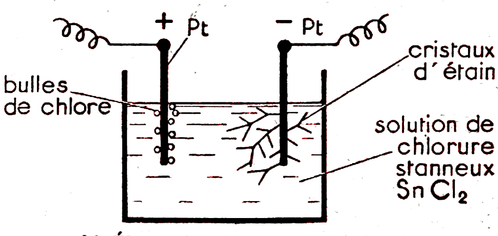


LOIS QUALITATIVES

■ **25. Expérience fondamentale.** — Prenons un récipient isolant dans lequel nous plaçons la solution à électrolyser. Le récipient est muni de deux pièces métalliques plongeant dans la solution; ce sont les *électrodes* (anode et cathode) et l'ensemble est appelé un *voltamètre*.

Quel que soit l'électrolyte nous constatons que lors du passage du courant, les produits de décomposition n'apparaissent qu'aux électrodes, d'où la première loi qualitative :

▶ ***Première loi :*** *Les produits de l'électrolyse n'apparaissent qu'aux électrodes.*



14. Électrolyse du chlorure d'étain.

Prenons une solution de chlorure stanneux $SnCl_2$ et deux

fils de platine comme électrodes; l'expérience faite dans une cuve plate est facilement projetable sur un écran. Au cours de l'électrolyse, nous voyons (*fig. 14*) que des bulles de chlore se dégagent à l'anode et que des cristaux d'étain viennent former de très jolies arborescences à la cathode.

Il y a là une électrolyse *simple* (sans phénomènes secondaires) que l'on retrouve chaque fois que le métal ne détruit pas l'eau et que l'anode est inattaquable. On constate toujours l'apparition à la cathode d'hydrogène ou de métaux, d'où la deuxième loi :

▶ **Deuxième loi** : *Dans une électrolyse simple, l'hydrogène ou les métaux apparaissent à la cathode.*

L'interprétation de ces deux lois est très facile dans la théorie des ions. On sait que le passage du courant provoque un triage électrolytique des ions. L'ion chlorure Cl , au contact de l'anode, perd un électron et se transforme en atome de chlore :

$$2\,Cl^- \longrightarrow Cl_2\nearrow + 2e^-$$

A la cathode, l'ion stanneux Sn^{++} reçoit deux électrons et redevient de l'étain métallique :

$$Sn^{++} + 2e^- \longrightarrow Sn.$$

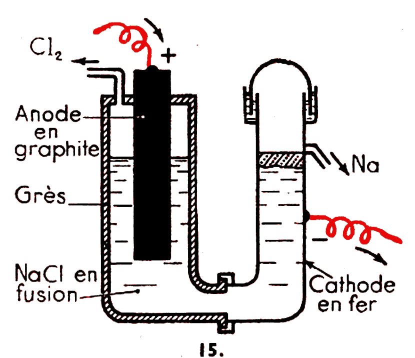
Ces échanges d'électrons ne peuvent avoir lieu qu'au contact des électrodes, d'où la première loi.

Citons, comme application, la préparation du sodium par électrolyse du chlorure de sodium fondu vers 850 °C (*fig. 15*). Ce sel en fusion, et par conséquent en dehors de toute dissolution, est en effet un électrolyte.

■ **26. Réactions secondaires.** — Il arrive souvent que les atomes ou radicaux provenant de la neutralisation électrique des ions donnent lieu à des réactions chimiques appelées réactions secondaires. On peut les classer de la façon suivante :

1° réactions sur les électrodes;
2° réactions sur le solvant;
3° décomposition d'un radical chimique instable;
4° réactions chimiques d'un composé anodique sur un composé cathodique.

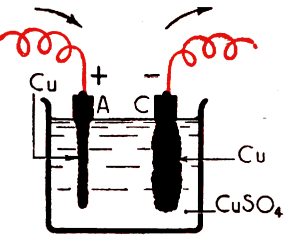
Nous citerons un exemple de chaque type.



15.
Électrolyse du chlorure de sodium fondu.

■ **27. Réactions sur les électrodes : anode soluble.** — Prenons un voltamètre contenant une solution de sulfate de cuivre avec anode en cuivre. Le cation Cu^{++} gagne 2 électrons sur la cathode, devient l'atome Cu qui se dépose sur cette cathode. L'anion SO_4^{--} perd à l'anode 2 électrons et régit sur le cuivre pour donner $Cu\,SO_4$ (qui

se dissocie en ions SO_4^{--} et Cu^{++}). Finalement du cuivre disparaît à l'anode et apparaît à la cathode : il y a simple transport de cuivre de l'anode à la cathode, et la concentration globale du liquide en sulfate de cuivre reste constante. L'anode disparaît peu à peu (*fig. 16*) : c'est le phénomène de l'anode soluble, résumé ici par le schéma :



16. Anode soluble.

électrolyte . . . . . $CuSO_4$

ions. . . . . Cu^{++} SO_4^{--}

↙ ↘

cathode anode

$$Cu^{++} + 2e \rightarrow Cu \qquad SO_4^{--} \rightarrow SO_4 + 2e$$

réaction secondaire : $SO_4 + Cu \rightarrow CuSO_4$.

Le phénomène se produit lorsqu'on électrolyse un sel en prenant comme anode le métal correspondant au sel : solution de nitrate d'argent avec anode en argent, solution de chlorure d'or avec anode en or, etc.... Il a reçu de nombreuses applications pour le nickelage, l'argenture, la dorure, le chromage (voir § 37)

▶ *Dans le phénomène d'anode soluble, la concentration globale de l'électrolyte ne change pas; il y a simple transport de métal de l'anode à la cathode.*

■ **28. Réaction sur le solvant.** — Électrolysons une solution étendue d'acide sulfurique H_2SO_4 avec électrodes de platine (*fig. 17*) :

H_2SO_4

$2H^+$ SO_4^{--}

↙ ↘

cathode anode

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2\nearrow \qquad SO_4^{--} \rightarrow SO_4 + 2e^-$$

réaction secondaire : $SO_4 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 + \frac{1}{2}O_2\nearrow$.

17.

Tout se passe comme si on avait électrolysé l'eau seule.

■ **29. Décomposition d'un radical chimique instable.** — Électrolysons une solution de soude NaOH :

2NaOH

$2Na^+$ $2OH^-$

↙ ↘

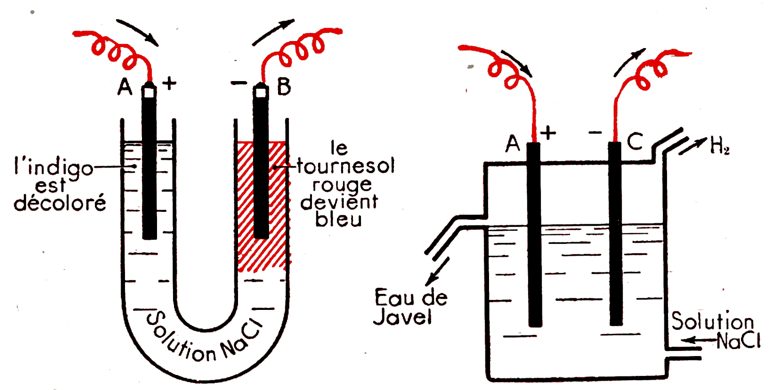
cathode anode

$$2Na^+ + 2e^- \rightarrow 2Na \qquad 2OH^- \rightarrow 2OH + 2e^-$$

$$2Na + 2H_2O \rightarrow 2NaOH + H_2\nearrow \qquad \underbrace{2OH}_{\text{instable}} \rightarrow H_2O + \frac{1}{2}O_2\nearrow.$$

Finalement, seule l'eau est décomposée.

■ **30. Réaction chimique d'un composé anodique sur un composé cathodique.** — Électrolysons une solution de chlorure de sodium avec deux électrodes inattaquables (platine ou charbon). Mettons une goutte de tournesol rouge à la cathode et un peu d'indigo à l'anode :



18. Électrolyse d'une solution de chlorure de sodium.

19. Fabrication d'eau de Javel.

au bout de peu de temps le tournesol vire au bleu tandis que l'indigo est décoloré (*fig. 18*).

$$2NaCl$$

$$2Na^{+} \quad 2Cl^{-}$$

$$\swarrow \qquad \searrow$$

cathode — anode

$$2Na^{+} + 2e^{-} \rightarrow 2Na \qquad 2Cl^{-} \rightarrow Cl_2\nearrow + 2e^{-}$$

$$2Na + 2H_2O \rightarrow 2NaOH + H_2\nearrow$$

Cl_2 se dégage mais se dissout en partie.

Rapprochons l'anode et la cathode : le chlore dissous réagit sur la solution de soude (*fig. 19*).

$$Cl_2 + 2NaOH \longrightarrow NaClO + NaCl + H_2O.$$

Le mélange NaClO + NaCl constitue l'eau de Javel.

■ **31. Prévision d'une électrolyse.** — En utilisant les règles précédentes, on peut prévoir la plupart des phénomènes simples accompagnant une électrolyse.

● EXEMPLES. — 1. *Prévoir les phénomènes accompagnant l'électrolyse d'une solution de sulfate de cuivre avec électrodes de platine.*

L'anion SO_4^{--} se dirige vers l'anode ; il y dépose deux électrons ; le radical SO_4 n'attaque pas le platine, mais réagit sur l'eau :

$$SO_4 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4 + \frac{1}{2} O_2\nearrow.$$

Le cation Cu^{++} gagne deux électrons, devient l'atome Cu qui se dépose sur le platine.

2. *Que se produit-il lors de l'électrolyse d'une solution de sulfate de sodium avec électrodes de platine?*

L'anion SO_4^{--} devient à l'anode SO_4 qui réagit sur l'eau :

$$SO_4 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4 + \frac{1}{2} O_2 \nearrow .$$

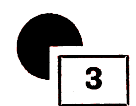
Les cations sodium $2Na^+$ deviennent à la cathode les atomes 2Na qui réagissent sur l'eau :

$$2Na + 2H_2O \longrightarrow 2NaOH + H_2 \nearrow .$$

Il y a donc formation d'acide sulfurique à l'anode et de soude à la cathode. Si les électrodes sont rapprochées, il peut se produire la réaction :

$$H_2SO_4 + 2NaOH \longrightarrow Na_2SO_4 + 2H_2O.$$

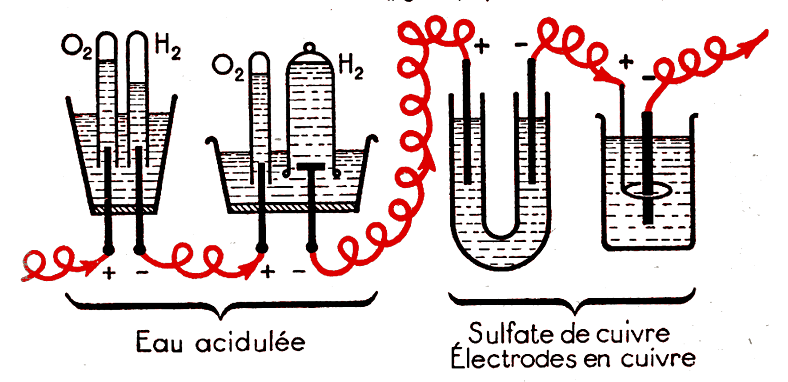
Dans ce cas, l'eau seule subit une décomposition.



LOIS QUANTITATIVES

32. Étude expérimentale. — L'étude expérimentale peut être faite avec des voltamètres donnant un dégagement gazeux, comme le voltamètre à eau acidulée, ou avec des voltamètres à anode soluble. Les mesures des volumes de gaz dégagé dans un tube gradué seraient moins précises que les pesées des poids de métal déposé à la cathode dans le second cas. Nous disposerons d'un chronomètre pour mesurer les durées des diverses décompositions électrolytiques.

33. Lois de Faraday. — Faisons passer le courant dans divers voltamètres de formes différentes (*fig. 20*), pendant un temps déter-



20. Vérification des lois de **Faraday.**

miné. Les volumes d'un même gaz recueilli sont les mêmes; les poids d'un même métal déposé aux cathodes sont les mêmes. La forme du voltamètre, la forme des électrodes, leurs distances, etc... ne sont pas intervenues.

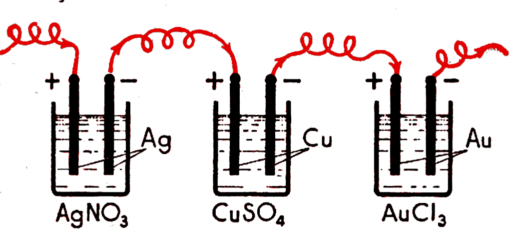
D'autre part, les volumes de gaz dégagés, les poids des cathodes dans le cas d'anodes solubles, s'accroissent proportionnellement à la durée de l'expérience.

Par *définition* de la quantité d'électricité (*voir* § : 6), le volume d'hydro-

gène recueilli est proportionnel à la quantité d'électricité qui a traversé le voltamètre pendant la durée de l'expérience. Comme l'expérience montre que *les poids d'électrolytes décomposés sont proportionnels aux volumes d'hydrogène dégagés, ils sont aussi proportionnels à la quantité d'électricité qui a traversé les appareils.*

▶ **Première loi.** *La quantité d'électrolyte décomposé est indépendante de la forme du voltamètre et de la grandeur des électrodes. Elle est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé le voltamètre.*

Plaçons maintenant en série dans un même circuit (*fig. 21*) des voltamètres à anode soluble : nitrate d'argent, électrodes en argent — sulfate de cuivre, électrodes en cuivre — chlorure d'or, électrodes en or, etc. On constate que les poids d'argent, de cuivre, d'or, déposés pendant un même temps sont respectivement proportionnels aux rapports :



21. Voltamètres en série.

$$\frac{107,88}{1}, \quad \frac{63,6}{2}, \quad \frac{197}{3},$$

fractions où le numérateur représente le poids atomique du métal et le dénominateur la valence du métal dans le sel électrolysé.

On a donné le nom d'***équivalent électrochimique*** ou de ***valence-gramme*** à ce quotient.

▶ *La valence-gramme d'un élément est le quotient de la masse atomique de cet élément par sa valence.*

On peut alors énoncer la deuxième loi de Faraday[1] :

▶ **Deuxième loi.** *La masse d'un corps simple libéré à l'une des électrodes par le passage d'une même quantité d'électricité est proportionnelle à la valence-gramme de ce corps simple.*

La quantité d'électricité qui libère à une électrode une valence-gramme d'un corps simple quelconque est donc toujours la même; on l'appelle le ***faraday.***

■ **34. Coulomb international.** — Pendant longtemps, le phénomène d'électrolyse a servi à définir la valeur du *coulomb international* (et par conséquent de l'*ampère international*).

▶ *Le coulomb international est la quantité d'électricité qui libère 1,11800 mg d'argent à la cathode d'un voltamètre à nitrate d'argent.*

L'ampère international dérive de cette définition par la formule $Q = I \times t$.

1. **Michaël Faraday** (1791-1867). Savant anglais dont les travaux sur la liquéfaction des gaz, l'influence électrique, l'induction électromagnétique sont restés classiques. Vers 1834 il étudie systématiquement l'électrolyse dont il imagine le vocabulaire : électrodes, anode, cathode, et dont il énonce les lois.

Calculons en coulombs la valeur du faraday : c'est le nombre de coulombs libérant une valence-gramme d'argent, soit : $\frac{107,88}{1}$ g; comme un coulomb libère 0,001118 g d'argent, le faraday vaut :

$$F = \frac{107,88}{0,001118} \text{ soit : } 96\,493 \text{ coulombs.}$$

Dans les problèmes, on arrondit ce nombre à 96 500 en général.

Nous avons signalé (§ : 7) que depuis le 1er janvier 1948, le coulomb et l'ampère définis par l'électrolyse sont remplacés légalement par l'ampère absolu et le coulomb absolu, définis par les propriétés magnétiques du courant.

L'ampère absolu n'est pas tout à fait égal à l'ampère international car il dépose 1,1183 mg d'argent au lieu de 1,1180 mg en une seconde.

35. Masse déposée par électrolyse. — Si 96 500 coulombs libèrent une masse $\frac{A}{n}$ grammes d'un corps simple de masse atomiques A et de valence n (valence-gramme), 1 coulomb libérera 96 500 fois moins, et $Q = I \times t$ coulomb ($I \times t$) fois plus. D'où la formule :

$$\underset{\text{gramme}}{p} = \frac{1}{96\,500} \cdot \underset{\frac{\text{masse atomique}}{\text{valence}}}{\frac{A}{n}} \cdot \underset{\text{ampère}}{I} \cdot \underset{\text{seconde}}{t}$$

- EXEMPLE. — *On électrolyse de l'eau acidulée par un courant de 5 ampères. Calculer le volume d'oxygène recueilli au bout de 10 secondes, volume mesuré dans des conditions normales.*

— *Première méthode* : Calculons la masse d'oxygène, sachant que A = 16 $n = 2$, $I = 5$, $t = 10$. La relation précédente donne :

$$p = \frac{16 \times 5 \times 10}{96\,500 \times 2} \quad \text{soit : } \mathbf{0{,}004145} \text{ grammes.}$$

Comme O_2 = 32 grammes occupent 22 400 $\overline{cm}^3$ dans les conditions normales, le volume cherché est :

$$V = \frac{22\,400 \times 0{,}004145}{32}, \quad \text{soit : } \mathbf{2{,}9}\ \overline{cm}^3.$$

— *Deuxième méthode* : On peut aussi raisonner directement; puisque la valence-gramme d'oxygène $\frac{O}{2}$ ou $\frac{O_2}{4}$ occupe $\frac{22\,400}{4}$ = **5 600** $\overline{cm}^3$ dans les conditions normales, le volume cherché est :

$$V = \frac{5\,600 \times Q}{96\,500} = \frac{5600 \times 5 \times 10}{96\,500}, \quad \text{soit : } \mathbf{2{,}9}\ \overline{cm}^3.$$

36. Valeur en coulomb de la charge de l'électron. — La théorie atomique étudiée dans le cours de Chimie admet la discontinuité de la matière, et nous avons appris en Seconde qu'un atome-gramme d'un élément quelconque contenait toujours le même nombre d'atomes réels, soit $N = 6{,}02 . 10^{23}$ (nombre *d'Avogadro*). Dans la théorie des ions, il nous faut de même distinguer l'***ion*** chlorure, qui correspond à l'atome réel de chlore chargé négativement, et l'***ion-gramme*** corres-

pondant au symbole Cl . Il y a évidemment autant d'ions dans un ion-gramme que d'atomes dans un atome-gramme, soit $6{,}02.10^{23}$.

D'après la deuxième loi de Faraday, la quantité d'électricité déposée par un ion-gramme de valence p est égale à : $96\,490 \times p$ coulombs. Chaque ion réel de valence p doit donc porter une charge égale, en valeur absolue, à :

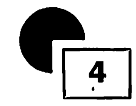
$$\frac{96\,490 \times p}{6{,}02.10^{23}} = 1{,}60.10^{-19} \times p \text{ coulombs.}$$

On voit que les charges des ions sont des multiples entiers d'une charge élémentaire égale à : $1{,}60.10^{-19}$ coulombs. Nous sommes ainsi conduits à l'existence de *grains d'électricité*, qui ne sont autres que les *électrons*, et qui correspondent à cette charge, la plus petite que l'on puisse envisager.

▶ *La valeur absolue de la charge d'un électron est égale à*

$$\mathbf{e} = \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{N}} = \frac{\mathbf{96\,490}}{\mathbf{6{,}02.10^{23}}}, \quad \textit{soit} \quad \mathbf{e} = \mathbf{1{,}60.10^{-19}} \textit{ coulomb.}$$

C'est la plus petite quantité d'électricité possible.



APPLICATIONS

■ **37. Emploi de l'électrolyse dans la grande et la petite industrie.** — L'électrochimie est une branche importante de la chimie. On utilise l'électrolyse dans la *préparation de nombreux corps simples* :



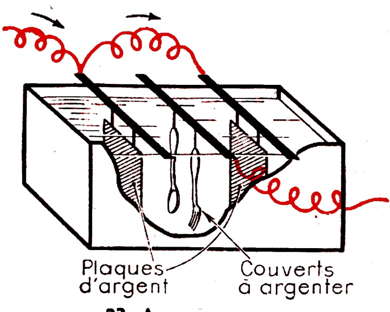


22. Moule d'une médaille pour la galvanoplastie.

chlore, hydrogène, oxygène, sodium, de *corps composés* comme l'eau de Javel, les chlorates et perchlorates, les persulfates et l'eau oxygénée. L'*électrométallurgie* de l'aluminium utilise l'électrolyse d'un mélange d'alumine et de cryolithe fondues.

Le raffinage électrolytique des métaux consiste à faire déposer le métal pur sur une cathode, l'anode étant constituée par le métal impur : les impuretés se déposent sous forme de boues au fond de la cuve. On obtient ainsi le fer et le cuivre électrolytiques, l'or « fin », l'argent « vierge ».

Par *galvanoplastie*, on dépose un métal sur un moule en gutta-percha dont la surface a été rendue conductrice par une couche de plombagine (fabrication des médailles, *fig.* 22) ou sur une pièce d'orfèvrerie (argenture des couverts en métal blanc, *fig.* 23). Les clichés d'imprimerie peuvent être reproduits et conservés par galvanoplastie. Tous ces procédés utilisent le principe de l'anode soluble qui est constituée par le métal pur à déposer.



23. Argenture.

La protection du fer contre la corrosion se fait par *nickelage*, *chromage*, etc... utilisant ces mêmes procédés d'anode soluble. Il en est de même pour *la dorure* et *l'argenture*.

Le *polissage électrolytique* se fait par usure très fine de la pièce métallique servant d'anode.

■ **38. Graduation d'un ampèremètre.** — Nous pourrions maintenant mesurer l'intensité d'un courant en intercalant un voltamètre dans le circuit; en déterminant le poids du corps simple libéré pendant un temps connu, et en appliquant la formule de l'électrolyse, nous en déduirions la valeur de l'intensité. Mais ce procédé serait incommode et très long. On peut cependant l'utiliser pour étalonner un *ampèremètre* (§ : 8), ou vérifier la graduation de cet appareil. Un courant passe dans le voltamètre puis dans l'ampèremètre dont l'aiguille dévie : on inscrit devant la graduation ainsi indiquée la valeur de l'intensité calculée d'après le résultat de l'électrolyse. En recommençant l'opération pour différentes intensités, on peut ainsi chiffrer les graduations de l'ampèremètre en ampères (ou milliampères, selon la sensibilité de l'appareil).

Ce procédé est malgré tout peu précis et on préfère graduer les ampéremètres en utilisant les phénomènes électromagnétiques.

◀ RÉSUMÉ ▶

*Les **électrolytes** sont des composés qui, fondus ou dissous dans l'eau, conduisent le courant électrique en subissant une décomposition : les principaux sont des acides, des bases ou des sels.*

*D'après la **théorie des ions** due à Arrhénius, les électrolytes sont dissociés en particules chargées d'électricité et appelées **ions.** Les métaux et l'hydrogène forment des ions positifs ou **cations;** le reste du composé forme l'**anion,** chargé négativement. La charge des ions est proportionnelle à leur **valence.***

Le passage du courant dans un électrolyte se fait par un double courant d'ions, les anions, allant à l'anode où ils apportent des charges négatives, les cations se dirigeant vers la cathode où ils reçoivent des charges négatives.

Les produits de l'électrolyse n'apparaissent qu'aux électrodes. L'hydrogène ou les métaux apparaissent à la cathode. Une électrolyse est quelquefois simple (chlorure de sodium fondu) mais souvent accompagnée de réactions secondaires. Ces réactions secondaires proviennent de l'action des atomes ou radicaux libérés sur les électrodes, sur le solvant, ou de l'instabilité d'un radical, parfois de réactions chimiques entre composés libérés.

*Les lois quantitatives de l'électrolyse sont les lois de **Faraday.***

1° La quantité d'électrolyte décomposée est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé le voltamètre.

*2° La masse d'un corps simple libéré à l'une des électrodes par le passage d'une même quantité d'électricité est proportionnelle à la **valence-gramme** du corps simple, quotient de sa masse atomique par sa valence. Pour libérer une valence-gramme, il faut 96 500 coulombs.*

On calcule la masse de corps simple libéré par la relation :

$$p = \frac{1}{96\,500} \cdot \frac{A}{n} \cdot I \cdot t$$

Un ion-gramme contient $N = 6{,}02 . 10^{23}$ *ions réels, ce qui conduit à admettre comme charge élémentaire d'un ion réel univalent une quantité d'électricité égale à* $e = \frac{96\,490}{6{,}02 . 10^{23}}$ *coulombs, soit* $\mathbf{e = 1{,}60 . 10^{-19}}$ ***coulomb;** c'est la charge de l'électron, charge élémentaire d'électricité.*

L'électrolyse a reçu de nombreuses applications pour la préparation de corps simples ou composés, pour le raffinage électrolytique et la galvanoplastie.

★ EXERCICES ★

6. — On fait passer un courant dans un voltamètre à sulfate de cuivre et à électrodes en cuivre; après 1 heure 20 minutes on trouve que le poids de la cathode a augmenté de 2,04 g. Quelle est l'intensité du courant utilisé ? Cu = 64.
Rép. : *1,29 ampère.*

7. — On électrolyse une solution de sel marin dans l'eau. Quel volume de chlore (supposé sec et mesuré dans les conditions normales) obtient-on au bout de 10 heures avec un courant de 800 ampères ?

8. — On argente sur les deux faces une plaque métallique d'épaisseur négligeable. Quelle doit être la densité de courant (en ampères par $\overline{dm}^2$ de surface de cathode) pour que le dépôt s'accroisse de 0,2 mm par heure ? Masse spécifique de l'argent : 10,7 g/$\overline{cm}^3$. Ag = 108.

9. — Quelle intensité de courant faut-il faire passer dans un voltamètre à eau acidulée pour obtenir 1 $\overline{cm}^3$ d'oxygène (mesuré sec et dans les conditions normales) en 10 secondes ?

10. — On place en série deux voltamètres, l'un à nitrate d'argent, l'autre à sulfate de cuivre. Le poids de cuivre déposé au bout d'une heure est 2,64 g; calculer le poids d'argent qui s'est déposé pendant le même temps. Cu = 64. Ag = 108.
Rép. : *8,91 g.*

11. — Dans la fabrication de l'aluminium par électrolyse, on utilise un courant d'intensité 32 000 ampères. Sachant que l'aluminium est trivalent, que Al = 27, calculer la masse théorique d'aluminium préparé en un jour. On obtient en fait 220 kg de métal par jour. Quel est le rendement en masse ?

12. — On prépare de l'hydrogène par électrolyse d'une solution de soude à 20 %. Écrire les réactions chimiques correspondantes. Calculer le volume d'hydrogène dégagé en une heure par cellule électrolytique employée sachant que chaque cellule est parcourue par un courant d'intensité 300 ampères.
Rép. : *125 litres* (mesurés dans les conditions normales).

13. — On veut déposer par électrolyse sur un objet métallique une couche d'argent d'épaisseur convenable et pesant 254,88 mg. On utilise un courant d'intensité constante égale à $\frac{1}{10}$ A; combien de temps durera l'opération ?

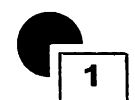
14. — On recueille dans la même éprouvette l'hydrogène et l'oxygène dégagés par électrolyse de l'eau acidulée. On a recueilli 168 $\overline{cm}^3$ en 16 mn 5 s. Calculer l'intensité du courant.
Rép. : I = *1 ampère.*

15. — Un courant de 3 A passe dans deux cuves à électrolyse disposées en série et contenant : la première, une solution de sulfate de cuivre avec anode en cuivre, la seconde, une solution d'acide sulfurique avec électrodes inattaquables. La masse de cuivre déposé sur la cathode de la première cuve est de 4,77 g. Calculer la durée du passage du courant et le volume total des gaz dégagés dans la seconde cuve. Cu = 63,6.

CHAPITRE IV

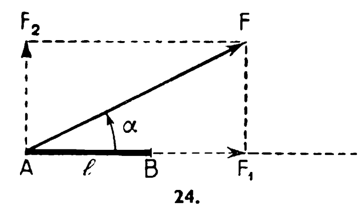
✶ TRANSFORMATIONS RÉCIPROQUES CHALEUR — TRAVAIL

1. Notions de travail et d'énergie.
2. Équivalence de la chaleur et du travail.



NOTIONS DE TRAVAIL ET D'ÉNERGIE

■ **39. Retour sur la notion de travail.** — Nous avons étudié dans la classe de Seconde (*Seconde CM*), la définition du travail d'une force. Rappelons que cette notion est mise en évidence par la fatigue que nous éprouvons à monter un poids, que cette fatigue est d'autant plus grande que le poids P ainsi que la hauteur h dont nous le montons sont plus grands, d'où l'expression numérique du travail effectué : $W = P \times h$. En remarquant que nous pouvons faire glisser un poids sur une table horizontale parfaitement polie sans aucune fatigue, nous avons précisé qu'un déplacement perpendiculaire à la force ne correspondait à aucun travail.



24.

Finalement, nous avons été amenés à prendre comme expression numérique du travail d'une force constante F dont le point d'application se déplace d'une longueur l dans une direction qui fait l'angle α avec la direction de la force (*fig. 24*), le produit :

$$\boxed{W = F.l.\cos\alpha}$$

Cette expression se justifie en décomposant la force en deux autres : $F_1 = F\cos\alpha$ dans la direction du déplacement, qui effectue le travail $W = F_1 \times l$; F_2, normale au déplacement, qui n'effectue aucun travail.

Rappelons les deux unités essentielles : le joule (J) et le kilogramme-mètre (kgfm).

$$\mathbf{W} = \mathbf{F} \times l \times \cos\alpha$$

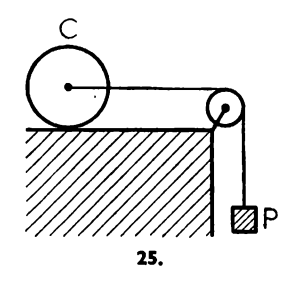
W	F	l
joule	newton	m
kgf × m	kgf.	m.

L'intérêt de cette notion a été mise en évidence dans l'étude des machines simples : quelle que soit la machine simple (poulie, treuil, plan incliné, leviers...), le travail de la force motrice est égal en valeur absolue au travail de la force résistante : c'est le *principe de la conservation du travail.*

On peut, avec un poids P_1, au moyen d'un treuil, d'un plan incliné, etc... soulever un poids P_2 : les produits $P_1 \times h_1$ et $P_2 \times h_2$ des poids par les déplacements verticaux h_1 et h_2 sont égaux. C'est grâce à cette remarque sur l'*invariance* de ces produits que des physiciens du XIII[e] siècle et du XVI[e] siècle comme *Jordanus de Nemore* et *Stevin* purent arriver à montrer l'intérêt de cette notion, à laquelle, beaucoup plus tard, on donna le nom de travail.

■ **40. La transformation du travail en énergie cinétique.** — Lorsqu'un corps tombe en chute libre, la force d'attraction terrestre ou ***poids*** du corps éprouve un déplacement dans sa propre direction, donc effectue un travail : $W = P \times h$. Nous pouvons *utiliser* ce travail pour soulever d'autres poids, pour faire tourner un moteur,....

Imaginons un cylindre placé sur un plan horizontal, relié à un fil passant sur une poulie (*fig. 25*). Accrochons à l'autre extrémité un poids P. Le système se met en mouvement, le poids P est tombé d'une hauteur h, et, pendant ce même temps, le cylindre s'est déplacé de h sur le plan horizontal. Qu'est devenu le travail $P \times h$ de la pesanteur? Il n'y a pas eu, comme dans le paragraphe précédent, de poids montés. Le travail du poids du cylindre est nul puisqu'il se déplace sur le plan horizontal. Mais le cylindre et le poids qui étaient au repos ont acquis une certaine vitesse, ils ont accumulé ce travail sous une autre forme; on l'appelle de ***l'énergie cinétique.*** Cette définition est logique : si nous faisions l'expérience en sens inverse, en lançant le cylindre sur le plan horizontal, de droite à gauche, le poids P serait soulevé peu à peu pendant que la vitesse du cylindre diminuerait. Il y aurait bien alors *production de travail*, conséquence de la diminution de vitesse.

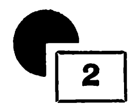


25.

▶ ***Définition.*** *L'énergie cinétique est l'énergie que possède un corps en mouvement; elle se mesure par le travail que ce corps peut fournir en revenant au repos.*

On peut citer de nombreux exemples analogues. Un cycliste descend une côte sans freiner et en roue libre : sa vitesse augmente, il acquiert de l'énergie cinétique provenant de travail de pesanteur (du poids total, machine et cycliste) : il peut, sans pédaler, remonter une côte qu'il rencontre au bas de la première.

Un marteau qui a une vitesse v frappe un clou; le marteau s'arrête et le clou produit un travail $W = F \times h$, en s'enfonçant de la quantité h, F étant la résistance à l'enfoncement.



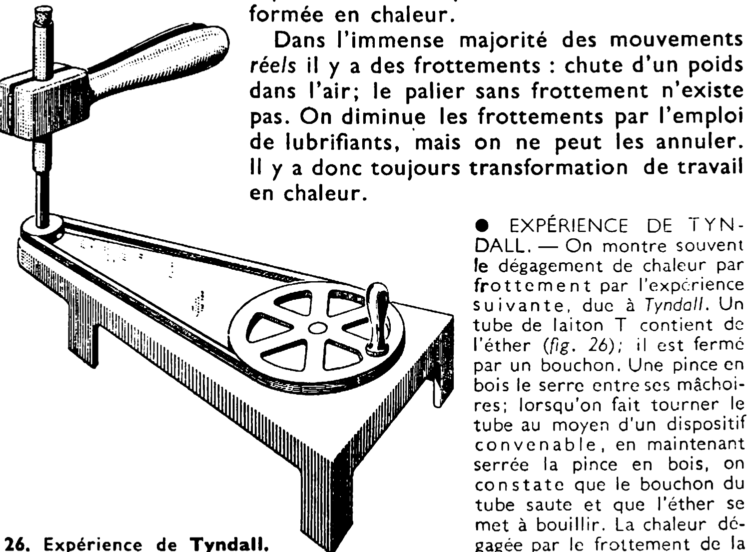
ÉQUIVALENCE DE LA CHALEUR ET DU TRAVAIL

■ **41. Production de chaleur par dépense de travail.** — Dans l'énoncé du principe de la conservation du travail dans les machines simples, nous avons toujours supposé que les mouvements envisagés se faisaient *sans frottements*. Que se passe-t-il s'il y a frottement?

Imaginons l'expérience suivante : nous faisons tourner une roue en lui appliquant un couple moteur C, et nous maintenons la vitesse de la roue *constante*, grâce à un sabot de frein qui frotte sur la jante. Nous fournissons à ce système le travail du couple, et nous ne récupérons ni énergie potentielle (aucun poids ne monte), ni énergie cinétique nouvelle (puisque la vitesse de la roue reste constante). Mais nous observons que le sabot de frein, la jante de la roue s'échauffent, et deviennent rapidement brûlants. Il y a donc eu production de chaleur qu'il serait possible d'évaluer en maintenant constante la température du système au moyen d'un courant d'eau : la mesure de la masse d'eau utilisée et de son élévation de température en permettrait le calcul.

Un cycliste descend une côte en freinant de façon à conserver une vitesse constante : les patins de freins et la jante s'échauffent, le travail de pesanteur s'est transformé en chaleur. Le même phénomène se produit lorsque le mécanicien d'une locomotive serre les freins d'un convoi pour l'arrêter sur un parcours horizontal : ici c'est l'énergie cinétique du convoi qui s'est finalement transformée en chaleur.

Dans l'immense majorité des mouvements *réels* il y a des frottements : chute d'un poids dans l'air; le palier sans frottement n'existe pas. On diminue les frottements par l'emploi de lubrifiants, mais on ne peut les annuler. Il y a donc toujours transformation de travail en chaleur.



26. Expérience de Tyndall.

● EXPÉRIENCE DE TYNDALL. — On montre souvent le dégagement de chaleur par frottement par l'expérience suivante, due à *Tyndall*. Un tube de laiton T contient de l'éther (*fig. 26*); il est fermé par un bouchon. Une pince en bois le serre entre ses mâchoires; lorsqu'on fait tourner le tube au moyen d'un dispositif convenable, en maintenant serrée la pince en bois, on constate que le bouchon du tube saute et que l'éther se met à bouillir. La chaleur dégagée par le frottement de la

pince sur le tube a élevé la température de l'éther, d'où augmentation de la pression maxima de vapeur et expulsion du bouchon.

Remarquons que, dans cette expérience, une partie de la chaleur a été transformée en énergie mécanique : c'est l'énergie cinétique du bouchon.

De la chaleur apparaît également au cours d'un choc : une balle de plomb frappant une cible rigide s'échauffe et peut fondre si sa vitesse est suffisante. Le martelage, le limage d'une pièce métallique échauffent cette pièce, ainsi que le marteau et la lime. Dans tous ces exemples, c'est l'énergie cinétique du corps en mouvement qui se transforme en chaleur.

■ **42. Production de travail par disparition de chaleur.** — Chauffons un gaz sous volume constant : sa pression augmente, et nous pouvons utiliser cet accroissement de pression pour repousser un piston avec une force F : cette force fournira du travail au cours du déplacement du piston.

Les moteurs thermiques : machines à vapeur, moteurs à explosion, utilisent la chaleur provenant de la combustion du charbon, du mazout, de l'essence pour fournir du travail. Dans la machine à vapeur, l'eau est vaporisée, ce qui nécessite de la chaleur; la vapeur repousse un piston, comme elle soulève le couvercle d'une marmite, et ce piston fournit du travail pendant que la vapeur se refroidit et se condense.

Les armes à feu, fusils, canons, transforment en énergie cinétique, communiquée au projectile, une partie de la chaleur provenant de la combustion de la poudre.

Nous pouvons conclure qu'il est possible de transformer de la chaleur en travail mécanique.

■ **43. Equivalence de la chaleur et du travail.** — Puisqu'il y a possibilité de transformer la chaleur en travail, et réciproquement, il est évident qu'il doit exister un lien entre les deux quantités : W qui mesure le travail fourni (ou reçu), et Q qui mesure la chaleur reçue (ou fournie).

De nombreuses expériences faites au siècle dernier ont conduit à ce résultat qui nous paraît s'imposer : *il existe un rapport constant entre* W *et* Q, autrement dit :

▶ *Quand une quantité de chaleur* Q *se transforme* ***intégralement*** *en travail* W *ou inversement, le rapport* $\frac{W}{Q}$ *est constant, c'est-à-dire indépendant du mode de transformation utilisé.*

$$\boxed{\frac{W}{Q} = J.}$$

On le désigne par J, appelé équivalent mécanique de l'unité de quantité de chaleur; si en effet Q = 1, W = J. Sa valeur dépend uniquement des unités choisies pour exprimer W et Q.

On admet actuellement les nombres suivants :

W en joules, Q en calories, J = **4,185** ou 1 calorie vaut 4, 185 joules.

W en kgm, Q en calories, J = **0,427** ou 1 calorie vaut 0,427 kgm.

▶ *Une calorie équivaut à 4,185 joules ou à 0,427 kgm.*

● EXEMPLE. — *Un poids de 20 kg tombe de 5 m, et au moment du choc sur le sol, toute l'énergie cinétique est transformée en chaleur. Quelle est la quantité de chaleur ainsi apparue?*

Le travail de pesanteur est $W = 20 \times 5 = 100$ kgm et la quantité de chaleur est $Q = \frac{W}{J} = \frac{100}{0{,}427} = 234$ calories.

■ 44. Le joule, unité de quantité de chaleur. — Dans la plupart des phénomènes physiques mettant en jeu du travail, il y a également apparition de chaleur. En électricité le passage du courant dans un moteur produit un dégagement de chaleur ainsi que du travail. Aussi est-il commode, pour calculer l'énergie totale mise en jeu, d'exprimer ces deux grandeurs, travail et chaleur, avec la même unité : ceci est possible d'après l'équivalence indiquée au paragraphe précédent.

On a donc retenu une seule unité : le joule et *on pourra exprimer les quantités de chaleur en joules* en se rappelant l'équivalence : *une calorie vaut 4,185 joules*. L'intérêt de ce choix est de rendre égal à 1 le facteur $J = \frac{W}{Q}$, donc de permettre sa suppression dans la formule : $W = Q$.

La chaleur massique de l'eau entre 15 et 16 °C est alors, par définition, égale à 4,185 joules/g/degré.

◀ *RÉSUMÉ* ▶

On dit qu'une force effectue un travail lorsqu'elle déplace son point d'application. La mesure de ce travail a comme expression :

$$W = F \times l \times \cos \alpha.$$

α, étant l'angle du déplacement avec la direction de la force.

*Au cours du mouvement d'un corps le travail des forces agissant sur ce corps peut être emmagasiné sous forme **d'énergie cinétique** et inversement tout corps animé d'une certaine vitesse peut fournir du travail.*

*Par frottements ou par chocs on peut produire de la chaleur en dépensant du travail. Les machines thermiques, machines à vapeur, moteurs à explosions, **transforment la chaleur en travail.***

*Quand une quantité de chaleur **Q** se transforme intégralement en travail **W** ou inversement, le rapport $\frac{W}{Q} = J$ est constant. C'est l'**équivalent mécanique de l'unité de quantité de chaleur.** Une calorie vaut 4,185 joules ou 0,427 kgm.*

*Il est commode de prendre comme unité de quantité de chaleur le **joule** ce qui rend égal à 1 le coefficient **J** précédent. Dans ces conditions :*

$$W = Q.$$

★ EXERCICES ★

16. — Calculer en joules la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de 200 g d'eau de 80°. — **Rép.** : *66 880 joules.*

17. — Un moteur a une puissance de 1 kilowatt, il actionne une roue freinée et maintenue à 15° par un courant d'eau prise à 10°. Quel est la masse d'eau utilisée en une minute?

18. — Un poids de 20 g tombe dans l'air; au bout de peu de temps il acquiert, à cause de la résistance de l'air, une vitesse constante de 8 mètres par seconde. Calculer le travail de la pesanteur en une minute, ainsi que la quantité de chaleur dégagée pendant ce temps par suite des frottements. — **Rép.** : *9,6 kgm; 22,5 cal.*

19. — On soulève un fardeau de 50 kg au moyen d'un treuil. Le tambour du treuil a un diamètre de 20 cm, la manivelle a une longueur de 40 cm. Mais, par suite de frottements, il faut appliquer à cette manivelle une force normale de 28 kgp. Calculer la chaleur dégagée par frottement lorsque le fardeau a été soulevé de 15 mètres.

20. — Un réchaud électrique consomme une puissance de 400 watts. Combien de temps faut-il pour faire bouillir un litre d'eau prise à 20°, sachant que la pression extérieure est de 760 mmm de mercure, et que 30 p. 100 de la chaleur dégagée par le réchaud est perdue dans l'air? Ce litre d'eau est placé dans une casserole d'aluminium pesant 400 g, de chaleur massique 0,22; comment le résultat précédent est-il modifié? — **Rép.** : *20 minutes; 21 minutes 40 secondes.*

21. — Un marteau-pilon pesant 6 tonnes est soulevé de 1,77 m et retombe sur un bloc de fer de masse 25 kg. On admet que tout le travail de pesanteur est transformé en chaleur; quelle est la quantité de chaleur dégagée au moment du choc? En supposant que cette chaleur est entièrement employée pour échauffer le bloc, combien de chocs faut-il pour élever la température du bloc de 20° à 100 °C. Chaleur massique du fer : 0,1.

22. — Un cycliste pesant avec sa machine 80 kgp descend une côte de 5 p. 100 à la vitesse constante de 24 km à 1 heure. Quelle est en joules et en calories la quantité de chaleur dégagée dans les freins au bout de 5 minutes, en admettant que la résistance de l'air est négligeable. Vous paraît-il normal que dans ces conditions le caoutchouc des freins sente le brûlé, même si la moitié seulement de cette chaleur est prise par les patins des freins? — **Rép.** : *18 750 joules; 18 800 cal.*

23. — Une ampoule de lampe à incandescence consomme une puissance de 60 watts. Elle est plongée dans un calorimètre dont la valeur en eau est de 436 g. Quelle est l'élévation de température du calorimètre au bout de 5 minutes?

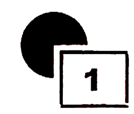
24. — On frotte l'un contre l'autre deux morceaux de bois de chaleur massique 0,42; admettons que la masse totale ainsi échauffée soit de 200 g; quel travail faut-il dépenser pour élever leur température de 450°? On peut admettre qu'il y a à ce moment inflammation. — **Rép.** : *158 000 joules ou 16 100 kgm.*

25. — Une chute d'eau a une hauteur de 20 mètres; en admettant que le 1/10 du travail de pesanteur soit transformé en chaleur, quelle est la différence de température entre l'eau au sommet et l'eau en bas de la chute?

CHAPITRE V

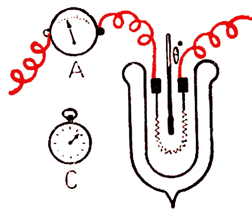
DÉGAGEMENT DE CHALEUR DANS LES CONDUCTEURS

1. Loi de Joule.
2. Applications.



LOI DE JOULE

■ **45. Etude expérimentale.** — C'est un fait d'observation journalière que le passage du courant électrique dans un conducteur dégage de la chaleur; nous utilisons les fers à repasser électriques, les radiateurs électriques, les réchauds et cuisinières électriques, etc. Ce dégagement de chaleur a été étudié par le physicien anglais Joule (1818-1899) qui en établit les lois vers 1840, d'où le nom d'***effet Joule*** donné à ce phénomène.



27. Étude de l'effet **Joule**.

L'étude quantitative en est réalisée au moyen d'un calorimètre contenant de l'eau ou mieux du pétrole (chaleur massique 0,5); dans ce calorimètre plonge un fil conducteur assez fin (*fig.* 27). Un ampèremètre A placé sur le circuit (*en série* avec le conducteur) permet de mesurer l'intensité du courant. L'élévation de température est repérée grâce au thermomètre θ et le temps de passage du courant est mesuré avec un chronomètre C.

Si M est la valeur en eau totale du calorimètre* et des accessoires, y compris le conducteur, θ_1 la température initiale, θ_2 la température finale, la quantité de chaleur dégagée pendant l'expérience est

$$Q = M(\theta_2 - \theta_1).$$

I. — Maintenons I constant et faisons varier la durée de l'expérience, nous constatons que :

* Revoir les notions essentielles de calorimétrie, *Cours de Seconde C et M.*

▶ *La quantité de chaleur dégagée par un courant d'intensité constante est proportionnelle à la durée du passage de ce courant.*

Ce résultat est d'ailleurs évident car, l'intensité restant constante, le conducteur restant le même, les conditions de l'expérience sont identiques pendant une minute quelconque de cette expérience.

2. — Réalisons une série d'expériences de même durée, mais avec des intensités variables. Nous obtenons les résultats suivants :

Durée de chaque expérience : 1 minute.									
Q cal	250	560	1000	1560	2240	3040	3960	5020	6150
I A	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Q/I^2	250	249	250	250	249	247	247	248	246

La quantité de chaleur dégagée croît plus vite que l'intensité; la dernière ligne montre que le rapport Q/I^2 y est constant (à 1 0/0 près).

▶ *Pour une durée constante d'expérience, la quantité de chaleur dégagée dans un conducteur déterminé est proportionnelle au carré de l'intensité du courant.*

¶ **Remarques :** 1. Nous avons déjà vu au chapitre 1 que l'effet Joule ne dépendait pas du sens du courant : c'est bien ce que représente le terme I^2, toujours positif quelque soit le signe de I.

2. D'où vient le dégagement de chaleur? Dans tout corps conducteur il circule des électrons où des ions dans les électrolytes. Ces particules rencontrent au cours de leur mouvement des atomes ou des ions, à ces chocs successifs correspond une apparition de chaleur; c'est un phénomène analogue à l'échauffement par frottements. La chaleur dégagée correspond donc au travail que le courant doit fournir pour vaincre le frottement électrique.

Résumons :

▶ *Pour un conducteur donné, la quantité de chaleur dégagée par le passage d'un courant est proportionnelle à la durée de passage du courant et au carré de l'intensité.*

On peut donc écrire la relation : $Q = K . I^2t$.

Le coefficient K dépend du conducteur utilisé mais aussi des unités choisies. Nous utiliserons comme unités de quantité de chaleur le joule (voir § 44).

■ **46. Résistance d'un conducteur.** — Dans l'expression précédente de l'énergie calorifique, la constante K dépend du conducteur utilisé. Ce coefficient mesure la grandeur de l'effet Joule lorsque le conducteur est parcouru pendant une seconde par un courant de un ampère. Il est naturel de l'appeler la ***résistance*** du conducteur, l'effet Joule étant dû à la difficulté qu'éprouvent les électrons pour se déplacer à l'intérieur de ce conducteur; on la désigne par la lettre R.

L'expression de la chaleur dégagée, en joules, s'écrit alors :

$$\boxed{Q = RI^2t.}$$

Elle traduit la ***loi de Joule*** :

▶ ***Loi de Joule.*** *La quantité de chaleur dégagée dans un conducteur par le passage d'un courant est proportionnelle à la résistance du conducteur (par définition de cette résistance), au carré de l'intensité et à la durée de passage du courant.*

■ **47. Unité de résistance : l'ohm.** — La formule $Q = RI^2t$ définit l'unité de résistance que l'on a appelée l'ohm.

▶ ***Définition.*** *L'ohm est la résistance d'un conducteur qui, parcouru par un courant de 1 ampère est en 1 seconde le siège d'un dégagement de chaleur égal à 1 joule.*

Le symbole de l'ohm est Ω. On utilise aussi les unités dérivées suivantes : le mégohm $M\Omega$ qui vaut 10^6 ohms et le microhm $\mu\Omega$ qui vaut 10^{-6} ohm.

Retenons avec ces unités la relation suivante :

Q	=	R	.	I^2	.	t.
joule		*ohm*		*ampère*		*seconde*

• **Remarque :** On peut désigner la chaleur dégagée indifféremment par les lettres Q ou W (énergie). Il faut toujours se rappeler que 1 calorie équivaut à 4,18 joules (voir l'exemple suivant).

● EXEMPLE. — *Un conducteur parcouru par un courant de 2 ampères est le siège d'un dégagement de chaleur égal à 120 calories par minute. Calculer le nombre de joules équivalents et la résistance de ce conducteur.*

1 calorie équivaut à **4,18** joules, donc

$$W = 4{,}18\,Q = 4{,}18 \times 120 = 501{,}6 \text{ joules.}$$

De la relation $W = RI^2t$, on déduit :

$$R = \frac{W}{I^2t} = \frac{501{,}6}{4 \times 60}$$

$$R = 2{,}09 \text{ ohms.}$$

■ **48. Puissance consommée par effet Joule.** — Rappelons que la puissance se mesure par l'énergie mise en jeu par seconde :

$$P = \frac{W}{t}.$$

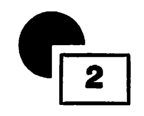
La puissance consommée par effet Joule est donc :

P	=	R	.	I^2.
watt		ohm		ampère

● EXEMPLE. — *Un fer à repasser consomme une puissance de 400 watts quand il est traversé par un courant de 4 ampères. Calculer la résistance du fil intérieur.*

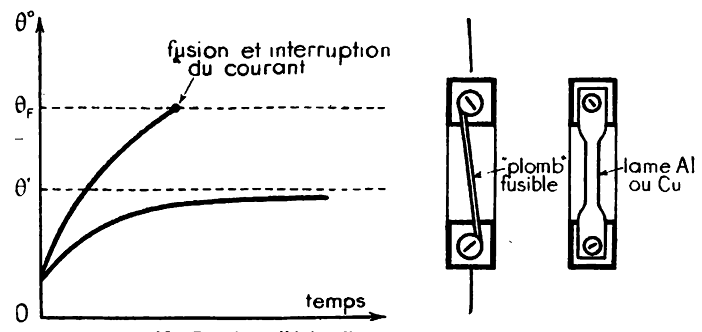
Nous avons la relation : $R = \frac{P}{I^2}$

$$R = \frac{400}{16} \quad \text{soit} \quad R = 25\,\Omega.$$



APPLICATIONS

■ **49. Equilibre thermique d'un fil parcouru par un courant.** — Faisons passer un courant dans un conducteur; il s'échauffe mais, en même temps il cède de la chaleur au milieu ambiant, surtout par rayonnement, et ceci d'autant plus que l'écart de température entre le conducteur et le milieu ambiant est plus grand. La température du fil parcouru par un courant va donc croître lentement jusqu'au moment où il rayonnera toute la chaleur apparue par effet Joule; la température

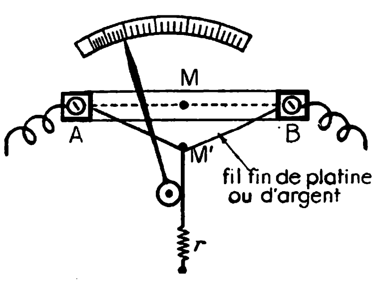


28. Courbes d'échauffement et fusibles.

θ' du fil n'augmente plus, c'est sa ***température d'équilibre*** (*fig. 28*).

Si le courant est plus intense, ou si le refroidissement est moins rapide, la température s'élève plus vite, sa valeur limite est plus élevée, et l'on peut atteindre la température de fusion θ_F du conducteur. Ce fait est utilisé pour couper un courant dès que son intensité devient trop forte : on emploie des ***coupe-circuits*** ou ***fusibles*** (*fig. 28*) constitués par des fils d'alliage plomb-étain ou d'aluminium, calibrés de façon à fondre pour une intensité supérieure à 5 ampères, 10 ampères, ...

■ **50. Ampèremètre thermique.** — Il est, comme son nom l'indique basé sur l'effet Joule. Un fil fin AB (*fig. 29*) est parcouru par le courant à mesurer; il s'échauffe, se dilate; son milieu M s'abaisse en M′ parce qu'il est tiré par un fil passant sur une poulie et



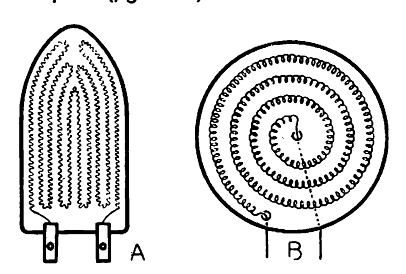
29. Ampèremètre thermique.

tendu par un ressort *r*. La poulie entraîne une aiguille se déplaçant devant un cadran gradué. Lorsque le fil a atteint son équilibre thermique, la dilatation cesse et l'aiguille se fixe devant une division du cadran. L'appareil est gradué par comparaison avec un ampère-étalon; les divisions sont très resserrées pour les faibles intensités.

¶ **Remarque :** L'ampèremètre thermique n'est fidèle que si on respecte les conditions de refroidissement imposées par le constructeur : si on bouche la grille qui existe souvent ou si on le place dans un courant d'air, ses indications sont faussées. L'appareil comporte souvent une « mise à zéro » en raison des résidus de dilatation possibles du fil AB.

Un avantage est qu'il n'est pas polarisé : ses indications ne dépendent pas du sens du courant, ce qui le fera utiliser en courant alternatif.

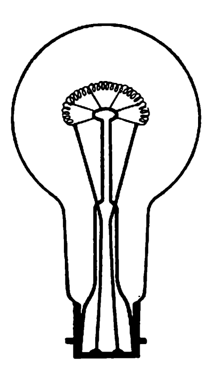
■ **51. Appareils de chauffage.** — L'effet Joule est utilisé dans tous les appareils de *chauffage par résistance*. Citons les *fers à repasser* dans lesquels (*fig. 30 A*) le conducteur est maintenu entre des feuilles de mica et d'amiante. Dans les *radiateurs, réchauds, cuisinières*, le conducteur est souvent un alliage inoxydable (ferro-nickel, nichrome); il est spiralé et maintenu dans une matière réfractaire (*fig. 30 B*). Ces appareils ont une puissance de l'ordre de 300 watts à quelques milliers de watts. Dans les fers électriques ou les plaques chauffantes, la chaleur dégagée élève la température d'une plaque métallique qui est en contact avec l'objet à chauffer, et qui lui transmet ainsi la chaleur par conduction.



30. Résistances **de fer à repasser et de réchaud.**

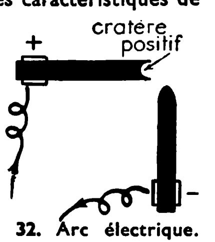
Souvent un thermostat permet de régler la température de l'appareil, en coupant automatiquement le courant, grâce à des bilames, dès que la température fixée tend à être dépassée.

■ **52. Eclairage par incandescence.** — Les *lampes à incandescence* (*fig. 31*) utilisent la propriété qu'ont les corps chauds d'émettre des radiations; la couleur de la lumière émise dépend de la température atteinte. Rouge vers 600°, elle devient blanche au-dessus de 2 000°. Aussi les filaments conducteurs doivent supporter sans fondre ces températures élevées; on utilise souvent le tungstène. Pour éviter une oxydation ou même une combustion, elles sont vidées de l'air qu'elles contenaient puis remplies, sous faible pression, d'un gaz rare inerte tel que l'argon ou le krypton afin d'éviter une sublimation trop rapide du filament. La température d'équilibre est de l'ordre de 2 600 °C. Le filament a un diamètre de l'ordre de $\frac{1}{40}$ mm et peut avoir 1 mètre de longueur; il est souvent spiralé. La puissance consommée est de l'ordre


31. Lampe à incandescence.

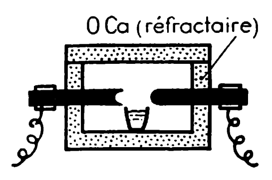
de 0,5 watt par candela. On trouve encore dans les laboratoires, comme résistances, des lampes à filament de carbone, donnant une lumière plus rouge et consommant jusqu'à 4 watts par candela.

On trouve sur le culot d'une lampe à incandescence les caractéristiques de cette lampe : tension d'utilisation (qui sera définie dans un autre chapitre), puissance consommée en watts et flux lumineux ou intensité. Cette dernière grandeur dépendant de la direction est abandonnée au profit du flux qui caractérise la fraction de puissance utile à l'éclairage. Par exemple, on lira : 60W (60 watts), 600 lumens (flux de lumière). L'efficacité lumineuse ou rapport du nombre de lumens au nombre de watts est d'autant plus grande que la température d'équilibre du filament est plus élevée.



32. Arc électrique.

Remarque : *L'arc électrique* n'est plus guère employé pour l'éclairage que dans les projecteurs : il est constitué (*fig. 32*) par deux électrodes de charbon reliées à un générateur. Si on les met en contact, il passe un courant intense et si on les écarte le courant continue à passer car il jaillit un arc entre les deux électrodes; à ce moment l'électrode positive par où arrive le courant est à une température de l'ordre de **3800°**. Elle émet une lumière très vive; le charbon positif se creuse en forme de cratère L'arc au charbon est utilisé comme moyen de chauffage dans certains fours électriques dits *fours à arc* du type Moissan (*fig. 33*) : la matière à traiter est contenue dans un creuset placé au voisinage de l'arc.



33. Four à arc.

■ **53. Les inconvénients de l'effet Joule. —** Dans de très nombreux cas, le dégagement de chaleur par effet Joule est une perte d'énergie qu'il conviendra de diminuer en agissant sur les deux facteurs, résistance et intensité. C'est ainsi que les lignes de transport du courant doivent avoir une résistance faible. Dans les moteurs et générateurs, il faut prévoir une ventilation suffisante pour éviter un échauffement exagéré.

La température d'équilibre dépend beaucoup des conditions extérieures; elle est plus élevée pour un fil isolé que pour un fil nu et ceci limite les intensités tolérées dans les canalisations électriques. Ainsi un fil sous baguette ne peut être utilisé que pour des intensités inférieures à 4 ampères par mm² de section du fil, alors qu'un fil nu peut supporter une intensité de 6 ampères par mm² de section.

◀ RÉSUMÉ ▶

Tout conducteur parcouru par un courant électrique est le siège d'un dégagement de chaleur. La chaleur ainsi dissipée est, d'après la ***loi de Joule,*** *proportionnelle au carré de l'intensité, à la durée de passage du courant :*

$$Q = RI^2t.$$

Le coefficient R *qui dépend du conducteur, s'appelle sa résistance; elle s'exprime en ohms, si* Q *s'exprime en joules,* I *en ampères et* t *en secondes.*
La puissance dissipée par l'effet Joule a comme expression :

$$P = RI^2.$$

P *en watts,* R *en ohms,* I *en ampères.*

Lorsqu'un conducteur est parcouru par un courant, il s'échauffe; mais, comme il cède de la chaleur au milieu ambiant, il atteint en général une ***température d'équilibre.***

*On peut utiliser l'effet Joule pour mesurer une intensité de courant; c'est ce qui est réalisé dans l'****ampèremètre thermique.***
Le chauffage électrique est une des applications les plus importantes de cet effet Joule : on l'utilise dans les fers à repasser, les réchauds et cuisinières.

L'éclairage par incandescence *est réalisé au moyen de filaments portés à très haute température par le courant électrique; ces filaments sont placés dans des ampoules remplies de gaz inerte (argon ou krypton).*

L'effet Joule a cependant des inconvénients : il constitue une perte d'énergie, et il peut provoquer la détérioration des appareils si l'intensité du courant est trop grande.

★ EXERCICES ★

26. — Une bouilloire électrique contient 300 g d'eau qui sont portés de 20° à 100° en 5 minutes quand l'intensité du courant est de 4 ampères. Calculer sa résistance. — **Rép.** : *20,9 Ω.*

27. — Une lampe à incandescence de 40 watts est allumée deux heures tous les soirs. Quelle est la consommation en kilowatt-heure à la fin d'un mois de 30 jours?

28. — La lampe précédente est traversée par un courant de 0,5 ampère. Quelle est sa résistance? — **Rép.** : *160 Ω.*

29. — Un four électrique consomme 2 kilowatts pour une intensité de 50 ampères. Quelle est sa résistance?

30. — Combien de temps faudra-t-il, dans un four électrique de 500 watts, pour porter à sa température de fusion qui est de 1 700° un bloc de fer de 100 g et de chaleur spécifique 0,1 ? La température initiale est de 20°. — **Rép.** : *2 min 20 s.*

31. — Une résistance dégage 50 calories en 1 minute avec un courant de 1 ampère Quelle est la quantité de chaleur dégagée en 4 minutes avec un courant de 0,5 ampère?

32. — Une résistance de 5 ohms est parcourue par un courant de 3 ampères pendant 6 min 58 sec. Quel est le nombre de calories dégagées par effet joule?
Rép. : *4 500 calories.*

33. — Une lampe électrique de 40 watts est plongée dans 1 litre d'eau à 15°. Quelle sera la température de l'eau au bout de 5 minutes?

34. — On place en série un voltamètre à eau acidulée et une résistance de 10 ohms plongée dans un calorimètre. En 16 mn 5 s, on observe un dégagement de 112 cm^3 d'hydrogène. Calculer l'intensité du courant et la quantité de chaleur dégagée pendant ce temps dans la résistance. Le calorimètre contient 200 g d'eau; le vase calorimétrique, de chaleur spécifique 0,1 pèse 308 g. Quelle est l'élévation de température observée au cours de l'expérience précédente?
Rép. : *$I = 1$A; $Q = 2\,308$ cal; $\Delta\theta = 10$ °C.*

35. — Combien de temps faut-il pour fondre 100 g de glace en utilisant la chaleur dégagée par un courant de 2 A passant dans une résistance de 5 Ω? Chaleur de fusion de la glace : 80 cal/g.

36. — On fait passer pendant 5 minutes un courant de 1 ampère dans un fil de résistance 3 ohms. Ce fil plonge dans un calorimètre qui contient 215 g d'eau; la température s'élève, au cours de l'expérience, de 17 °C à 18 °C. En déduire le nombre de joules équivalents à une calorie. (On négligera la capacité calorifique du vase du calorimètre.) — **Rép.** : *4,18 joules.*

37. — Les deux fils de transport d'énergie électrique ont une résistance totale R = 16 Ω. La puissance disponible au départ de la ligne est de 160 kW; à l'arrivée elle n'est plus que 144 kW. En déduire l'intensité du courant dans la ligne et le rendement du transport d'énergie ainsi réalisé. Quelle masse d'eau prise à 20 °C pourrait être portée à l'ébullition par la chaleur perdue en ligne en un jour?

38. — On utilise dans une baignoire 200 litres d'eau à 37 °C; l'eau est chauffée électriquement et est prise initialement à la température de 12 °C. Sachant que le prix du kilowatt-heure est de 20 f, calculer le prix de revient de ce bain.
Rép. : *116 f.*

39. — Un fil de cuivre, cylindrique, de 1 mm^2 de section a atteint sa température d'équilibre; il est parcouru par un courant de 6 ampères. Calculer la puissance qu'il rayonne par unité de surface. Résistance d'un fil de cuivre de 1 m de longueur et de 1 mm^2 de section : 0,016 Ω.

40. — Comparer les quantités de chaleur dégagées pendant le même temps dans trois conducteurs des résistances 4Ω, 6Ω, 8Ω respectivement parcourus par des intensités de 6 A, 4 A, 3 A.

41. — Un chauffe-eau électrique de capacité 30 litres consomme une puissance de 600 W. Il est alors parcouru par un courant de 5 ampères. Calculer sa résistance.
Les 30 litres d'eau étant à une température initiale de 15 °C et à une température finale de 60 °C, calculer, en admettant qu'il n'y ait aucune perte de chaleur, le temps nécessaire pour échauffer l'eau.

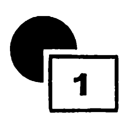
42. — Les dimensions d'une salle sont 4 m × 4 m × 3 m.; combien faudrait-il de temps pour porter l'air de cette salle de 0 °C à 20 °C en utilisant un radiateur électrique de 1 kW et en admettant qu'il n'y ait aucune perte de chaleur. Masse volumique de l'air : 1,3 g/litre; chaleur massique de l'air 0,24 cal/g/degré.
Rép. : *20 min 54 s ≠ 21 min.*

43. — Reprendre l'exercice précédent en admettant une perte de chaleur égale à 20 % de la chaleur produite par le radiateur.

CHAPITRE VI

RÉSISTANCE DES CONDUCTEURS

1. Résistance et résistivité.
2. Applications.



RÉSISTANCE ET RÉSISTIVITÉ

■ **54. Addition des résistances.** — La résistance d'un conducteur est définie par le coefficient R de la formule de Joule :

$$Q = W = RI^2t.$$

Considérons plusieurs conducteurs placés à la suite l'un de l'autre parcourus par le même courant I : nous les appellerons des *conducteurs en série*. Soient R_1, R_2, R_3 leurs résistances définies par les égalités :

$$W_1 = R_1I^2t$$
$$W_2 = R_2I^2t$$
$$W_3 = R_3I^2t.$$

dans lesquelles W_1, W_2, W_3 sont les énergies dissipées par effet Joule. Pour l'ensemble, l'énergie totale dissipée est :

$$W = W_1 + W_2 + W_3$$

ou $$W = R_1I^2t + R_2I^2t + R_3I^2t = (R_1 + R_2 + R_3)\,I^2t$$

Par définition, la résistance entre les points extrêmes est R telle que :

$$W = RI^2t.$$

La comparaison des deux formules donne :

$$R = R_1 + R_2 + R_3.$$

▶ *Plusieurs résistances placées en série s'ajoutent.*

■ **55. Influence des dimensions d'un conducteur sur la valeur de sa résistance.** — Nous n'étudierons que les conducteurs cylindriques, c'est-à-dire de section constante supposée faible vis-à-vis de la longueur. Reprenons un calorimètre dans lequel nous plongeons un fil cylindrique conducteur de même nature mais de longueur ou de section variant d'une expérience à l'autre. De la mesure de la quantité de chaleur dégagée, nous déduisons la valeur de la résistance R. Nous opérons à intensité constante.

1. — Si la longueur double, l'élévation de température du calorimètre en un temps donné double : la résistance a donc doublé. Elle est proportionnelle à la longueur du conducteur. Ce fait découle de l'addition des résistances en série : la résistance du tout est la somme des résistances des deux moitiés.

2. — Prenons deux fils de même longueur, mais de sections différentes; si l'une est double de l'autre on constate que le dégagement de chaleur y est deux fois plus faible. La résistance varie en raison inverse de la section.

▶ *La résistance d'un conducteur cylindrique est proportionnelle à sa longueur et inversement proportionnelle à sa section.*

On peut donc poser la relation :

$$R = \rho . \frac{l}{s}.$$

Le coefficient ρ s'appelle la ***résistivité*** du conducteur. On applique souvent la formule avec les unités suivantes : l est exprimé en cm, s en cm^2, R en ohms; la résistivité s'exprime alors en *ohms* $\times$ *cm* ($\Omega \times$ cm). Mais ces unités ne sont pas cohérentes; l'ohm dérivant du joule et de l'ampère est en fait une unité du système : mètre, kilogramme, seconde (M. K. S.). On devrait donc appliquer cette formule avec les unités suivantes : R en ohms, l en m, s en m^2. La résistivité ρ s'exprime alors en ohms $\times$ m ($\Omega \times$ m). $1\Omega \times$ m vaut $10^2\ \Omega \times$ cm.

Ainsi, l'argent possède, à la température de 15 °C, une résistivité de $1,5.10^{-6}\Omega \times$ cm ou $1,5.\ 10^{-8}\Omega \times$ m.

■ 56. Variations de la résistivité. — La résistivité dépend de la nature du conducteur et de sa température.

Le tableau de la page 44 donne quelques valeurs de ρ à 15° C. Il appelle les remarques suivantes : pour les bons conducteurs, métaux ou alliages, la résistivité est très faible; on l'exprime en *microhms* $\times$ *cm* (10^{-6} ohm $\times$ cm); elle varie de $1,5\,\mu\Omega \times$ cm pour l'argent à $100\mu\Omega \times$ cm pour le nichrome.

Pour les métalloïdes *semi-conducteurs*, comme le carbone graphite, ρ est de l'ordre de $10^{-3}\Omega \times$ cm.

Pour les électrolytes, ρ dépend de la concentration et est de l'ordre de quelques ohms $\times$ cm.

Viennent enfin les isolants ayant une très grande résistivité, de l'ordre de plusieurs mégohms $\times$ cm.

■ 57. Influence de la température. — La résistivité d'une substance dépend de sa température.

Si ρ_0 est la résistivité à 0 °C, ρ sa résistivité à t °C, on peut écrire :

$$\rho = \rho_0(1 + at).$$

a est appelé le coefficent de température.

Pour les ***métaux purs,*** ρ croît avec la température; $a > 0$ reste de

I. CORPS BONS CONDUCTEURS

MÉTAUX

	ρ (à 15°)	a
Argent	1,5 μΩ cm	0,004
Cuivre	1,6 —	0,004
Aluminium. . . .	2,5 —	0,004
Zinc	6 —	0,004
Tungstène. . . .	7 —	0,004
Fer.	12 —	0,006
Nickel.	12 —	0,006
Plomb.	20 —	0,004
Mercure.	95 —	0,0009

ALLIAGES

	ρ (à 15°)	a
Maillechort : Cu : 60 % Zn : 25 % Ni : 15 %.	30 μΩ cm	0,0003
Manganine : Cu : 85 % Mn : 11 % Ni : 4 %.	40 —	# 0
Constantan : Cu : 60 % Ni : 40 %.	50 —	# 0
Ferronickel : Fe : 75 % Ni : 25 %.	80 —	—
Nichrome : Ni : 60 % Cr : 12 % Fe : 28 %	137 —	0,0002

II. CORPS MOYENNEMENT CONDUCTEURS

MÉTALLOÏDES

Carbone (filament de lampe).. . .	4.10 ^{3}Ω cm	—0,0003
Carbone graphite	5.10^{-3} —	—
Charbon des cornues	6.10^{-3} —	—

ÉLECTROLYTES

solution H_2SO_4 à 5 %.	4,8 Ω cm	# — 0,02
solution H_2SO_4 à 10 %.	2,5 —	
solution H_2SO_4 à 30 %.	1,35 —	
solution $CuSO_4$ à 5 % .	20 —	
solution $CuSO_4$ saturée.	53 —	
solution NaCl saturée	4,6 —	
solution NaOH à 10 %	3,2 —	

III. CORPS TRÈS MAUVAIS CONDUCTEURS (ISOLANTS)

Eau distillée . . .	5 MΩcm	Porcelaine. . . .	2.10^{9} MΩcm
Eau très pure . .	20 —	Caoutchouc . . .	10^{10} —
Bois	50 à 10^{3} —	Ebonite.	$2,8.10^{10}$ —
Papier.	10^{3} à 10^{6} —	Paraffine.	10^{12} —
Verre.	9.10^{7} —		

l'ordre de 0,004 (voir le tableau ci-dessus). Le mercure, métal liquide fait exception; *a* est plus faible. Ainsi la résistance d'une lampe à incandescence à filaments de tungstène est 10 fois plus forte à chaud qu'à froid. Les *thermomètres à résistance* utilisent la variation de résistance

d'un conducteur pour repérer sa température. Signalons que, aux très basses températures (2 à 6° absolus), la résistivité de certains métaux devient extrêmement faible : le métal est dit *supraconducteur*.

Le coefficient de température des ***alliages*** est plus faible que celui des métaux purs. Il est pratiquement nul pour le constantan, d'où le nom de cet alliage.

La résistivité des ***métalloïdes*** semi-conducteurs et des ***électrolytes*** diminue quand la température croît : a est négatif.

● EXEMPLES. — 1. *Calculer la résistance d'un câble de cuivre de 1 km de long et de 25 $\overline{mm}^2$ de section. Résistivité du cuivre : 1,6 Ω × cm.*

Exprimons les dimensions en unités convenables :

1 km vaut 100 000 cm
25 $\overline{mm}^2$ valent 0,25 $\overline{cm}^2$.

On a donc :

$$R = \frac{1{,}6}{10^6} \cdot \frac{100\,000}{0{,}25} = \frac{1{,}6}{2{,}5} = 0{,}64 \text{ ohm}.$$

On peut encore écrire :

$$\rho = 1{,}6.10^{-8}\Omega \times \text{m}. \quad \rho = 10^3 \text{ m} \quad s = 25 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

d'où

$$R = \frac{1{,}6}{10^8} \cdot \frac{10^3}{25.10^{-6}} = \frac{16}{25} = 0{,}64\,\Omega.$$

2. *A quelle température faut-il porter un fil métallique pris à 0° pour que sa résistance augmente de 10 % ? $a = 0{,}004$.*

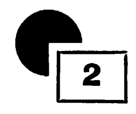
Il faut que sa résistivité augmente de 10 %

$$\rho = \frac{11}{10}\rho_0$$

et on obtient :

$$\frac{11}{10}\rho_0 = \rho_0(1 + at)$$

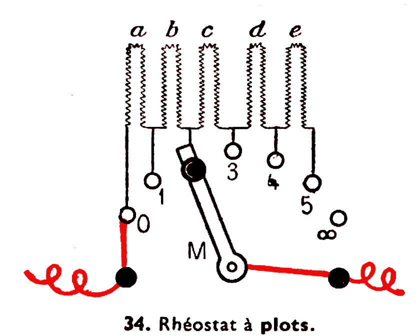
$$at = \frac{1}{10} \qquad t = \frac{1}{0{,}04} = 25° \text{C}.$$



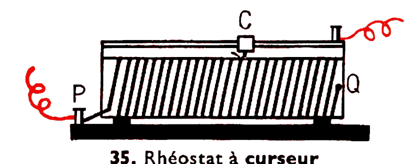
APPLICATIONS

■ **58. Rhéostats.** — Un rhéostat est une *résistance variable* à volonté que l'on introduit dans un circuit. Les rhéostats sont constitués par un fil d'alliages de grande résistivité et peu oxydables tels que le *maillechort* ou le *ferro-nickel*. Les modèles les plus employés sont les *rhéostats à plots* et les *rhéostats à curseur*

Dans les rhéostats à plots (*fig. 34*), des résistances a, b, c,... sont intercalées entre des plots de cuivre sur lesquels peut appuyer une lame de ressort solidaire d'une manette M tenue par un manche isolant. Dans le cas de figure, le courant passe par la manette, les résistances b, a et sort par le plot O. Si la manette est sur le plot 5, le courant traverse la totalité des résistances; si elle est sur le plot ∞ , le circuit est coupé. Sur le plot 0, le rhéostat ne sert à rien;



34. Rhéostat à **plots.**



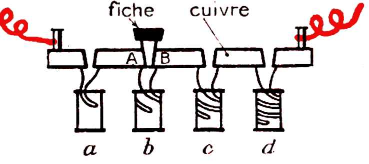
35. Rhéostat à **curseur**

il est en *court-circuit*. L'inconvénient d'un tel rhéostat est que la variation de résistance est brusque d'un plot à un autre.

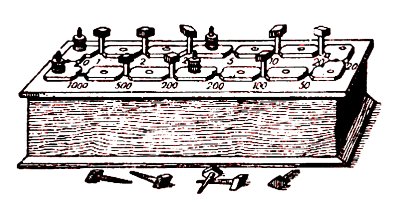
Dans le rhéostat à curseur (*fig. 35*) le fil résistant est enroulé sur un support isolant; un curseur C à lame de ressort appuie sur le fil et glisse sur une barre métallique de grosse section, donc de résistance négligeable. Dans le cas de la figure le courant traverse le rhéostat entre P et C; la portion CQ est hors circuit. Quand le curseur glisse sur la barre, les variations de résistance sont plus faibles que dans le rhéostat à plots.

On utilise souvent du fil émaillé; les spires sont jointives et on enlève l'émail sur la trajectoire du curseur.

■ **59. Boîte de résistances étalonnées.** — Pour les mesures précises, on dispose d'une boîte de résistances étalonnées. Entre des barres de cuivre larges et pratiquement de résistance négligeable, sont intercalés des fils résistants de manganine *a*, *b*, *c*, etc., de valeur bien déterminée (*fig. 36*). Si l'on place une fiche de cuivre entre A et B par exemple, le courant passe tout droit à travers les barres et la fiche, puisqu'il n'y rencontre aucune résistance; la résistance *b* est mise hors circuit. La résistance intercalée entre les bornes de l'appareil est donc égale à la somme des résistances correspondant *aux fiches enlevées* (*fig. 37*). Les diverses résistances sont distribuées comme les masses marquées utilisées avec une balance :



36. Schéma d'une boîte de résistances.



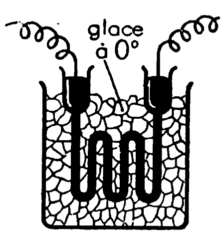
37. Boîte de résistances.

1, 2, 2, 5, 10, 20, 20, 50, etc.

ce qui permet de réaliser des résistances de 1 en 1 ohm depuis 0 jusqu'à 2 110 ohms dans le cas de la figure.

¶ **Remarque :** Les boîtes de résistances étalonnées sont fragiles et ne doivent pas trop s'échauffer par effet Joule; il ne faut les faire traverser que par un courant très faible et pendant un temps très court.

◇ **60. Ohm international.** — Le Bureau international des Poids et Mesures a réalisé une résistance d'un ohm (employée autrefois comme définissant l'ohm international) et constituée par une colonne de mercure de section constante, à 0°, de 106,300 cm de longueur, pesant 14,4521 grammes (*fig. 38*). La section est de 1 $\overline{mm}^2$. La valeur légale de cette résistance est en réalité de 1,00049 ohm. On a réalisé d'autres étalons en fil de manganine ou d'un alliage inoxydable d'or à 2,1 % de chrome.



38. Ohm international.

Mais on a renoncé à construire de *véritables étalons* de résistance représentant l'ohm de façon absolue, comme on l'a fait pour le mètre étalon. En fait on connaît simplement la valeur correcte en ohm de chaque étalon à $\frac{1}{100.000}$ près.

◀ RÉSUMÉ ▶

*La **résistance** d'un conducteur dépend de ses **dimensions géométriques,** de sa **nature** et de sa **température.***

A température constante, la résistance se calcule par l'expression :

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s}.$$

*Le coefficient ρ s'appelle la **résistivité;** elle s'exprime en ohm × cm (R en ohm, l en cm et s en cm²) ou en ohm × m (R en ohm, l en m et s en m²).*

*Pour les corps bons conducteurs, ρ est de l'ordre de quelques microhms × cm; la résistivité **croît avec la température :***

$$\rho = \rho_0(1 + at).$$

*Pour les **métalloïdes semi-conducteurs,** la résistivité est de l'ordre de 10^{-3} ohm × cm; elle décroît lorsque la température croît.*

Les résistances de conducteurs en série s'ajoutent.

*Les **rhéostats** sont des résistances variables; ils peuvent être à **plots** ou à **curseur.** Les **boîtes de résistances étalonnées** servent aux mesures de précision*

★ EXERCICES ★

44. — Quelle longueur faudrait-il donner à un fil de cuivre (ρ = 1,6 = 1,6 µΩ cm) pour qu'il ait même résistance qu'une colonne de mercure de 1 m de long (ρ' = 95 µΩ cm) et de même section ? — **Rép.** : *59 m.*

45. — Un fil de nichrome (ρ = 100 µΩ cm) a 2 mètres de long et 1/5 mm de diamètre. Calculer sa résistance.

46. — On enroule sur un cylindre de 6 cm de diamètre 20 spires d'un fil de maillechort de 1 mm de diamètre. Calculer la résistance ainsi formée (ρ = 30 µΩ cm). **Rép.** : *1,44* Ω.

47. — Calculer le coefficient de température d'un fil de tungstène sachant qu'à 2 420° sa résistance est 12 fois plus grande qu'à 0°.

48. — Un thermomètre à résistance de platine a une résistance de 10 Ω à 0°. Calculer sa résistance à la température d'ébullition normale de l'eau ? (a = 0,004). Quelle est sa température quand sa résistance est égale à 11 Ω ? — **Rép.** : *14* Ω; 25°.

49. — Une barre de cuivre d'une boîte de résistances étalonnées a 3 cm de long et une section de 2 cm^2. Calculer sa résistance (ρ = 1,6 $\mu\Omega$ cm).

50. — Un câble de cuivre de masse volumique 8 g/cm^3 pèse 200 kg et sa résistance est de 0,64 Ω. Calculer sa longueur et sa section (ρ = 1,6 $\mu\Omega$ cm). — **Rép. :** *1 km; 25 mm^2.*

51. — Un fil de ligne téléphonique a 5 km de longueur et 2 mm de diamètre. Calculer sa résistance dans les deux cas suivants : 1° il est en bronze siliceux :

$$\rho = 1{,}8.10^{-8}\ \Omega \times m$$

2° il est en fer : $\rho = 12.10^{-8}\ \Omega \times m$.

52. — Un câble de cuivre destiné à une ligne de transport de l'énergie a une section de 0,8 cm^2; on veut le remplacer par un câble d'aluminium de même longueur ayant même résistance. Quelle doit être la section de ce câble? Calculer le rapport des masses de chacun de ces câbles. Résistivité de Cu : $1{,}6 \times 10^{-8}\ \Omega \times m$; de Al : $2{,}5 \times 10^{-8}$.

Masse volumique du cuivre : 8,9 g/cm^3; de l'aluminium 2,7 g/cm^3.

Rép. : *section = 1,25 cm^2; rapport des masses de Al et Cu = 0,38.*

53. — Calculer la résistance d'une colonne cylindrique de 4 cm^2 de section et de 30 cm de longueur, contenant une solution de sulfate de cuivre dont la résistivité est $\rho = 0{,}3\ \Omega \times m$.
En déduire la chaleur dégagée dans cette solution lorsqu'elle est parcourue par un courant de 5 ampères pendant 10 minutes.

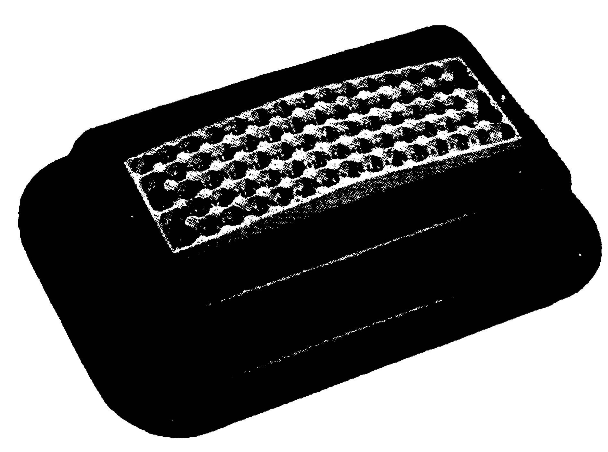


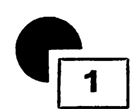
Photo Hachette.

Radiateur électrique.

CHAPITRE VII

✱ DIFFÉRENCE DE POTENTIEL LOI D'OHM

{ **1.** Notion de différence de potentiel.
2. Loi d'Ohm : cas d'une résistance pure.



NOTION DE DIFFÉRENCE DE POTENTIEL

■ **61. Le courant électrique transporte de l'énergie.** — Le passage du courant dans un circuit s'accompagne de ***phénomènes énergétiques :*** il y a dégagement de chaleur (effet Joule); le courant provoque des réactions chimiques aux électrodes d'un voltamètre; son passage dans un moteur produit un travail mécanique.

Ce sont là trois manifestations différentes qui permettent d'affirmer que le ***courant électrique transporte de l'énergie,*** le mot ***énergie*** désignant tout ce qui peut être transformé en travail, ou, ce qui est équivalent (*ch. IV*), en chaleur.

Ce fait n'est pas particulier au courant électrique : tout phénomène physique s'accompagne en général de transformations énergétiques et il y a là un aspect très important de l'étude d'un phénomène. On peut, par exemple, étudier la chute d'un corps par la mesure des espaces parcourus; c'est un aspect purement formel; on peut au contraire envisager la variation d'énergie (cinétique) du corps qui tombe. En fait le phénomène physique ne sera parfaitement connu que si on en a envisagé ces deux aspects.

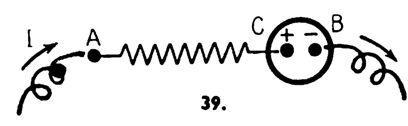
On pourrait donc étudier le mécanisme du passage du courant, c'est-à-dire, du déplacement des électrons : cet aspect formel est beaucoup trop complexe pour cette classe et il faut nous contenter d'envisager les conséquences énergétiques du phénomène étudié ici : le passage du courant.

L'énergie mise en jeu par le courant ne peut provenir que du ***générateur*** qui, lui aussi, sera le siège de transformations énergétiques complexes. Sans nous préoccuper de l'ensemble d'un circuit, nous pouvons d'abord étudier ce qui se passe dans une portion de circuit, phénomène plus simple.

■ **62. Différence de potentiel ou tension entre deux points d'un circuit.** — En 1827, le savant allemand **Ohm**, professeur à l'Université de Cologne, publiait un mémoire assimilant la conduction de l'électricité à la conduction de la chaleur. Pour qu'une quantité de chaleur

passe d'un corps sur un autre, il faut qu'il y ait entre ces deux corps une différence de température. Ce fait le conduisit à penser, par analogie, que le passage d'une quantité d'électricité Q d'un point A à un point B d'un circuit parcouru par un courant devait être attribué à l'existence entre A et B d'une différence d'état : nous dirons qu'il existe entre A et B une ***différence de potentiel*** ou ***tension.***

Sans en chercher la cause, nous définirons cette différence de potentiel par des considérations purement énergétiques. Pour cela, supposons que le circuit comprenne entre A et B (*fig. 39*) une résistance AC, et un moteur ou un voltamètre CB. Le courant d'intensité I qui traverse cet ensemble produit un effet Joule dans la résistance; il y a également dégagement de chaleur dans le moteur ou le voltamètre mais, en plus, le moteur fournit du travail mécanique, le voltamètre est le siège de réactions chimiques. Entre les points A et B on peut donc recueillir, pendant un temps t correspondant au passage d'une quantité d'électricité $Q = I \times t$, une certaine énergie W.



39.

Nous *conviendrons de mesurer la différence de potentiel entre A et B* par le quotient :

$$V_A - V_B = \frac{W}{Q}.$$

Si P est la puissance mise en jeu, I, l'intensité de courant, on peut écrire : $W = P \times t$ et $Q = I \times t$; la relation précédente devient :

$$V_A - V_B = \frac{P}{I}.$$

▶ *La différence de potentiel* $V_A - V_B$ *entre deux points d'un circuit parcouru par un courant s'exprime par le quotient des nombres mesurant la puissance recueillie entre* A *et* B *et l'intensité de courant qui y circule.*

La notation $V_A - V_B$ forme un tout; chaque terme ne signifie rien; *on ne sait calculer qu'une différence de potentiel.* On peut cependant dire que A est à un potentiel plus élevé que B, sans pouvoir attribuer une valeur précise à chacun d'eux.

Nous conviendrons de compter cette différence de potentiel ***positivement dans le sens du courant.***

■ **63. Unité de différence de potentiel : le volt.** — La formule de définition de la différence de potentiel relie nécessairement l'unité de différence de potentiel aux unités de puissance et d'intensité. Celles-ci étant le ***watt*** et l'***ampère,*** l'unité de différence de potentiel est le ***volt*** (du nom du physicien italien *Volta*).

▶ ***Définition.*** *Le volt est la différence de potentiel qui existe entre deux points d'un circuit transportant un courant constant de 1 ampère lorsque la puissance dissipée entre ces points est de 1 watt.*

C'est là la définition légale du volt (Loi du 14 janvier 1948).

On peut donc écrire les relations très importantes qui ne sont qu'une conséquence de la définition de la différence de potentiel et du choix des unités :

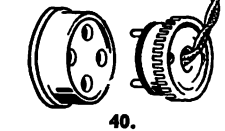
$P = (V_A - V_B) \cdot I$
watt — volt — ampère

$W = (V_A - V_B) \cdot Q$
joule — volt — coulomb

ou encore :

$W = (V_A - V_B) \cdot I \cdot t$
joule — volt — ampère — seconde

Remarques : 1. On peut, dans une certaine mesure, rapprocher la formule $W = (V_A - V_B) \cdot Q$ de celle qui donne le travail effectué par un poids P tombant de la hauteur h : $W = P \times h$. Ceci reviendrait à assimiler une différence de potentiel $V_A - V_B$ à une différence de niveau h. L'analogie n'est pas très correcte car P est une force et non une quantité de matière alors que Q est une quantité d'électricité; elle peut cependant aider à comprendre les phénomènes énergétiques accompagnant le passage du courant.



40.

2. Dans les installations électriques, on trouve souvent des « prises de courant » (*fig. 40*) : ces prises de courant sont reliées, par l'intermédiaire du réseau de distribution aux deux pôles du générateur. Entre leurs bornes il existe une différence de potentiel pratiquement constante.

■ 64. Addition des différences de potentiel. — Soient plusieurs portions de circuit AB, BC, CD disposées en série et par conséquent traversées par le même courant I, et ne comprenant pas de générateurs. Les puissances mises en jeu dans chacune de ces portions sont :

$$P_1 = (V_A - V_B)\, I$$
$$P_2 = (V_B - V_C)\, I$$
$$P_3 = (V_C - V_D)\, I.$$

Si l'on envisage l'ensemble, la puissance totale est :

$$P = (V_A - V_D)\, I.$$

Or :

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$
$$(V_A - V_D)\, I = (V_A - V_B)\, I + (V_B - V_C)\, I + (V_C - V_D)\, I$$
$$V_A - V_D = (V_A - V_B) + (V_B - V_C) + (V_C - V_D).$$

On aboutit à une identité algébrique, ce qui justifie la notation : « différence de potentiel »; on peut, dans les calculs, considérer ces expressions comme de véritables différences.

● **EXEMPLES. — 1.** *Un fer électrique consomme une puissance de 600 watts; il est alimenté sous une différence de potentiel de 120 volts. Calculer l'intensité qui parcourt la résistance du fer.*

On calcule cette intensité à partir de la relation :

$$P = (V_A - V_B)\, I$$

ce qui donne

$$I = \frac{P}{V_A - V_B} = \frac{600}{120} = 5 \text{ A}.$$

2. *On place en série un rhéostat et un moteur entre les deux bornes d'une prise de courant alimentée sous 120 volts. L'intensité du courant qui traverse le circuit*

est de 1,5 ampère lorsque la résistance du rhéostat est de 10 ohms. Calculer la puissance consommée par effet Joule dans le rhéostat, la puissance consommée par le moteur, la différence de potentiel aux bornes du moteur et aux bornes du rhéostat.

D'après la loi de Joule, la puissance consommée dans une résistance R parcourue par un courant I est $p = RI^2$; ici $p = 10 \times (1,5)^2$ **watts**; ou $p = 22,5$ watts.

La puissance totale consommée entre les deux bornes A et B de la prise de courant est : $P = (V_A - V_B)\,I$ soit $P = 120 \times 1,5 = 180$ **watts.**

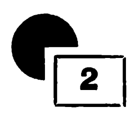
Il en résulte que la puissance utilisée par le moteur est

$$p' = P - p = 180 - 22,5 = 157,5 \text{ watts.}$$

Enfin la différence de potentiel aux bornes A′ et B moteur a pour expression : $V_{A'} - V_B = \frac{p'}{I}$

$$V_{A'} - V_B = 105 \text{ volts.}$$

Aux bornes du rhéostat : $V_A - V_{A'} = 120 - 105 = 15$ **volts.**



LOI D'OHM : CAS D'UNE RÉSISTANCE PURE

■ 65. Relation entre la différence de potentiel, l'intensité et la résistance. — Prenons le cas d'une résistance unique AB, appelée encore *résistance pure (fig. 41)* parcourue par un courant I. Cette résistance ne dissipe d'énergie que sous forme de chaleur; la puissance correspondant à cet effet Joule vaut :

$$P = RI^2.$$

Mais comme d'autre part :

$$P = (V_A - V_B)I$$

on voit que :

$$(V_A - V_B)I = RI^2$$

soit : $V_A - V_B = RI$

41.

Cette relation fondamentale traduit la *loi d'Ohm*.

▶ ***Loi d'Ohm :** La différence de potentiel aux bornes* **A** *et* **B** *d'une résistance pure* R *parcourue par le courant* I *est proportionnelle à la résistance* R *et à l'intensité* I *et s'exprime par la formule :*

$$\underset{\text{volt}}{V_A - V_B} = \underset{\text{ohm}}{R}\;\underset{\text{ampère}}{I}$$

Remarques : 1. On donne souvent le nom de **chute ohmique** de potentiel au produit RI.

2. Nous avons écrit que l'énergie totale mise en jeu n'apparaissait que sous forme de chaleur ou de travail mécanique. Cependant le courant crée un effet magnétique dans l'espace entourant le conducteur et il n'est pas évident que l'entretien de cet effet constant ne nécessite pas d'énergie. L'expérience a montré que, en régime permanent, lorsque *le courant reste constant* il en est bien ainsi; *aucune énergie électromagnétique n'est mise en jeu dans un circuit immobile parcouru par un courant d'intensité constante.* Nous verrons dans une autre classe que si l'intensité du courant varie, il n'en est plus ainsi. En particulier, lorsqu'on établit le courant en fermant l'interrupteur il y a dépense d'énergie supplémentaire communiquée à l'espace environnant du fait qu'il s'y établit un effet magnétique. Nous n'étudierons pas ici ces phénomènes.

● **EXEMPLE.** — *Une lampe à incandescence, branchée sur une prise de courant présentant une différence de potentiel égale à 120 volts est traversée par un courant de 0,25 ampères. Quelle est la résistance de la lampe?*

Il suffit d'appliquer la loi d'Ohm : $V_A - V_B = RI$

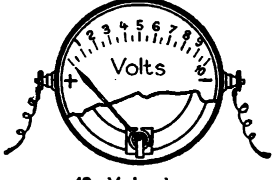
ou $$R = \frac{V_A - V_B}{I} \qquad R = \frac{120}{0{,}25} = 480\,\Omega.$$

■ 66. Voltmètres.

— Un ampèremètre possède une *résistance intérieure r*. On appelle ainsi la résistance de la portion de circuit placée entre ses bornes : celle des bobines, ou du cadre, ou du fil qui se dilate dans l'ampèremètre thermique. Entre ses bornes A et B, lorsqu'il est traversé par le courant *i*, il existe une différence de potentiel :

$$V_A - V_B = ri.$$

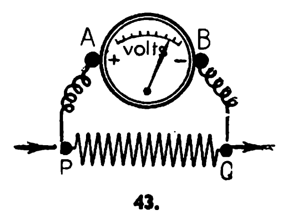
Or *r* est une constante de l'appareil; pour connaître $V_A - V_B$, il faut multiplier toutes les indications du cadran par *r*. C'est ce qui est réalisé dans un *voltmètre* où le constructeur a directement indiqué le nombre de volts correspondant à chaque division (*fig. 42.*)



42. Voltmètre.

▶ ***Un voltmètre n'est autre qu'un ampèremètre dont les graduations donnent en volts la différence de potentiel entre ses bornes, c'est-à-dire le produit r.i de la résistance entre ses bornes par l'intensité du courant qui le traverse.***

Comment utiliser un voltmètre? Soit à mesurer la différence de potentiel entre deux points PQ d'un circuit parcouru par un courant. Nous relions par des fils de résistance négligeable les points P et Q aux bornes A et B du voltmètre (*fig. 43*) : le voltmètre est dit *en dérivation* sur PQ. Il est traversé par un courant *i* et l'aiguille indique directement le produit *r.i*, c'est-à-dire la différence de potentiel cherchée.



43.

Nous verrons dans l'étude des courants dérivés que, *pour modifier le moins possible la différence de potentiel à mesurer, il faut que le voltmètre ait la plus grande résistance possible* : on ajoute une résistance à celle de l'ampèremètre qui, traversé alors par un courant faible, doit être très sensible.

▶ ***Un voltmètre se branche en dérivation entre les deux points dont on veut mesurer la différence de potentiel. Il doit avoir une très grande résistance.***

¶ **Remarque :** En modifiant la résistance mise en série avec un ampèremètre on peut obtenir un voltmètre à plusieurs sensibilités.

● EXEMPLE. — *Quelle résistance faut-il mettre en série avec un ampèremètre dont la résistance est de 2 ohms, supportant une intensité maximum de 0,5 ampère pour le transformer en voltmètre capable de mesurer une différence de potentiel de 120 volts?*

Pour la déviation maximum de l'aiguille, i = **0,5 ampère,** la différence de potentiel

$$V_A - V_B = ri \quad \text{doit être égale à} \quad \mathbf{120\ volts.}$$
$$120 = r \times 0{,}5 \qquad r = 240 \text{ ohms.}$$

Comme la résistance propre de l'ampèremètre est de **2** ohms, la résistance additionnelle sera r' = **240 — 2 = 238 ohms.**

■ **67. Applications de la loi d'Ohm.** — **Supposons que l'on dispose d'une prise de courant donnant entre ses bornes une différence de potentiel constante $V_A - V_B$. En intercalant dans le circuit un rhéostat, on peut faire varier la résistance, donc l'intensité du courant. On comprend mieux l'intérêt des rhéostats qui servent *au réglage* de l'intensité dans un circuit.**

● EXEMPLE. — *Dans une expérience de vérification de la loi de Joule, on branche en série une résistance constante de 10 Ω plongée dans un calorimètre et un rhéostat l'ensemble est alimenté sous une différence de potentiel de 120 volts. Calculer les résistances du rhéostat pour obtenir des intensités de 1, 2 ou 3 ampères.*

Soit x la résistance du rhéostat; la résistance totale est $R = 10 + x$ et la loi d'Ohm donne :

$$V_A - V_B = (10 + x)\,I \qquad \text{d'où} \qquad 10 + x = \frac{120}{I}$$

$$x = \frac{120}{I} - 10.$$

Pour

$$I = 1A, \quad x = 110\,\Omega$$
$$I = 2A, \quad x = 50\,\Omega$$
$$I = 3A, \quad x = 30\,\Omega.$$

◀ RÉSUMÉ ▶

Le passage d'un courant électrique dans un circuit s'accompagne de ***phénomènes énergétiques*** *: dégagement de chaleur par effet Joule, réactions chimiques dans un voltamètre, production de travail par un moteur.*

Pour interpréter le passage du courant entre deux points A et B d'un circuit nous disons qu'il existe entre ces deux points une ***différence de potentiel*** *et nous convenons de mesurer cette différence de potentiel par le quotient des nombres exprimant la puissance recueillie entre A et B et l'intensité du courant :*

$$V_A - V_B = \frac{P}{I} = \frac{W}{Q}.$$

L'unité de différence du potentiel est le **volt.** *(P en watts, I en ampère, ou W en joules, Q en coulombs.)*

Lorsque plusieurs conducteurs sont placés en série, les différences de potentiel s'ajoutent.

*La **loi d'Ohm,** relative à une résistance pure, exprime que la différence de potentiel aux bornes de la résistance est proportionnelle à la résistance* R *et à l'intensité* I *et s'exprime par la formule :*

$$V_A - V_B = R.I.$$

*Un **voltmètre** est constitué par un ampèremètre placé en série avec une grande résistance; l'appareil indique directement le produit* $V_A - V_B = ri$, *différence de potentiel entre ses bornes. Il est gradué en volts et se branche en dérivation entre les points du circuit pour lesquels on veut évaluer la différence de potentiel.*

★ EXERCICES ★

54. — La différence de potentiel aux bornes d'un voltamètre est de 6 volts lorsque cet appareil est traversé par un courant de 2 ampères. Calculer la puissance consommée par ce voltamètre. — **Rép. :** *12 watts.*

55. — On place **en série** : une résistance de 16 ohms, un voltamètre et un rhéostat. L'intensité qui passe dans ce circuit est de 5 ampères lorsqu'il est branché sur une prise de courant de 120 volts; la différence de potentiel aux bornes du voltamètre seul est alors égale à 20 volts. Calculer les puissances absorbées par la résistance fixe, le voltamètre et le rhéostat ainsi que les différences de potentiel aux bornes de la résistance et du rhéostat.

56. — Un moteur qui consomme 240 watts est parcouru par un courant de 2 ampères; quelle est la différence de potentiel entre ses bornes. Sa résistance intérieure étant égale à 2 ohms, calculer la perte de puissance par effet Joule à l'intérieur du moteur. — **Rép. :** *120 V; 8 watts.*

57. — Un réchaud électrique de puissance 400 watts est branché sur une prise de courant de 120 volts; quelle est la résistance du réchaud? Le compteur de l'installation ne pouvant supporter plus de 5 ampères, quelle est la puissance maximum d'un appareil que l'on pourra brancher, sans faire fondre les fusibles?
Rép. : *36 Ω; 600 watts.*

58. — Un fil de maillechort de 1 mm^2 de section de 1 m de long, de résistivité 30 μ Ω cm est soumis à une tension de 6 volts. Quelle est l'intensité du courant?
Rép. : *20 ampères.*

59. — Une lampe à incandescence, à filament de tungstène, consomme 0,25 ampère sous une tension de 110 volts. Le fil incandescent, boudiné, a 1 m de long. Quel est son diamètre, la résistivité du tungstène étant de 77 μΩ cm?— **Rép. :** *0,015 mm.*

60. — Dans l'exercice précédent, le filament de la lampe est à 2 500°. Calculer sa résistance à cette température, et la comparer à sa résistance à 0°, le coefficient de température du tungstène étant 0,004?

61. — Une lampe de 60 watts est branchée sur une prise de courant de 120 volts. Quelle est l'intensité du courant? Quelle est la résistance de la lampe en fonctionnement? — **Rép. :** *0,5 A; 240 Ω.*

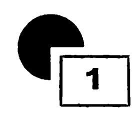
62. — Une lampe à incandescence comporte les indications : 220 V, 60W; quelle est l'intensité qui la parcourt? Quelle est la résistance du filament? — **Rép. :** *0,27 A, 806,7 Ω.*

63. — Deux lampes à incandescence sont marquées, l'une 120 V, 40W, l'autre 120 V, 75W. Calculer les intensités passant dans chacune d'elles lorsqu'on les utilise normalement. Peut-on sans inconvénient les brancher en série sur une prise de courant marquant 220 V?

64. — Sur un rasoir électrique on lit les indications : 120 volts, 8 watts. Calculer la valeur de la résistance qu'il faut mettre en série avec ce rasoir pour l'utiliser sous une différence de potentiel de 240 volts. — **Rép. :** *1 800 Ω.*

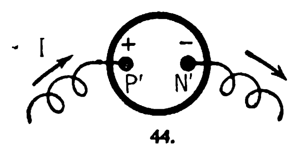
CHAPITRE VIII

✱ RÉCEPTEURS
FORCE CONTRE-ÉLECTROMOTRICE



DÉFINITIONS

■ **68. Récepteurs.** — Prenons le cas d'un voltamètre ou d'un moteur, parcourus par un courant I (*fig. 44*); le courant entre par la borne marquée +, ou positive P′; il sort par la borne marquée —, ou négative N′. Le récepteur est le siège d'un effet Joule : le courant traverse des bobinages dans un moteur, un électrolyte dans un voltamètre, et il y a toujours dégagement de chaleur; mais du point de vue *utile*, les calories correspondantes sont perdues. Ce que l'on utilise effectivement, c'est le travail du moteur, la décomposition chimique réalisée par le courant dans le voltamètre.



44.

▶ *Nous appellerons récepteur tout système qui, parcouru par un courant électrique, fournit de l'énergie sous une autre forme que la chaleur.*

Une simple résistance chauffante ne doit donc pas être considérée comme un récepteur proprement dit.

■ **69. Force contre-électromotrice.** — Un récepteur parcouru par un courant fournit une énergie distincte de la chaleur : énergie mécanique du moteur, énergie correspondant aux transformations chimiques d'un voltamètre. Cette énergie ainsi transformée est empruntée aux charges électriques qui traversent ce récepteur, et il est naturel de poser qu'elle est proportionnelle à la quantité d'électricité débitée en un temps donné :

$$\mathbf{W = e \cdot Q.}$$

Le facteur de proportionnalité e est appelé la ***force contre-électromotrice*** du récepteur (en abrégé f. c. e. m.).

On peut encore écrire les relations équivalentes :

$$\mathbf{W} = \mathbf{e}.\mathrm{I}.\mathbf{t} \quad \text{ou} \quad \mathbf{P} = \mathbf{e}.\mathrm{I}$$

▶ *La **force contre-électromotrice** d'un récepteur s'exprime par le quotient des nombres mesurant la puissance fournie par le récepteur autrement que par effet Joule et l'intensité du courant qui traverse ce récepteur.*

L'*unité* servant à mesurer la f. c. e. m. est évidemment le **volt,** si on exprime P en watts et I en ampères.

On pourra écrire finalement :

P = e. I	ou	W = e . I . *t*		W = e . Q
watt volt ampère		joule volt amp. sec.		joule volt coulomb

■ **70. Cas d'un moteur.** — Un moteur est constitué par un circuit mobile entre les pôles d'un aimant ou d'un électro-aimant. Si ce circuit est parcouru par un courant, il se met à tourner, mais nous verrons qu'il se produit alors dans la partie mobile un courant qui tend à s'opposer au courant initial (*Voir ch. XIX*); c'est là l'origine de cette force contre-électromotrice. Elle n'existe que si le moteur tourne. *Un moteur arrêté n'a pas de force contre-électromotrice; il se comporte comme une résistance pure.* Ce résultat est bien en concordance avec le fait que le moteur arrêté ne fournit aucun travail :

$$W = 0, \quad I \neq 0, \quad \text{donc} \quad e = 0.$$

Mais prenons un moteur qui tourne *à vide*, sans fournir de travail et avec des frottements négligeables (le travail dépensé pour vaincre les frottements intervient dans le calcul de la f. c. e. m.) : W = 0; comme le moteur tourne, $e \neq 0$, donc I = 0. *Un moteur tournant à vide n'est parcouru par aucun courant.* C'est à peu près ce que l'on vérifie avec un moteur de ventilateur sans palettes et parfaitement graissé. En fait il y a toujours un courant très faible à cause des frottements qui ne sont jamais nuls.

● EXEMPLE. — *Un moteur électrique (fig. 45) est traversé par un courant de 5 ampères. Il soulève en 2 secondes à 1 m de hauteur un poids de 100 kg; calculer sa force contre-électromotrice.*

Le travail accompli par le moteur en 2 secondes est :

$$W' = 100 \times 1 = 100 \text{ kgm}$$

ou, en joules :

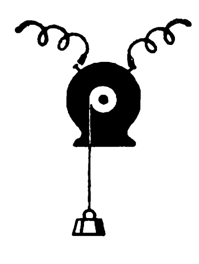
$$W' = 9{,}81 \times 100 = 981 \text{ joules.}$$

La puissance mise en jeu est alors : $P = \frac{W'}{t}$

$$P = \frac{981}{2} = 490{,}5 \text{ watts.}$$

La f. c. é. m. vaut alors : $e = \frac{P}{I}$

$$e = \frac{490{,}5}{5} = 98{,}1 \text{ volts.}$$



45.

■ **71. Force contre-électromotrice d'un voltamètre.** — L'électrolyse met en jeu de l'énergie chimique; le voltamètre est un récepteur et possède donc une force contre-électromotrice e.

Remarquons d'ailleurs que la relation $W = e \times Q$ est conforme à la loi quantitative de l'électrolyse : pour décomposer une certaine quantité d'électrolyte, il faut une énergie W bien déterminée; celle-ci est bien proportionnelle à la quantité d'électricité Q, comme l'est la quantité d'électrolyte décomposé (§ : *33*).

● EXEMPLE. — *Calculer la force contre-électromotrice d'un voltamètre à eau acidulée, en admettant que la seule énergie chimique mise en jeu corresponde à la destruction de l'eau en hydrogène et oxygène.*

Lorsque l'hydrogène et l'oxygène se combinent pour former une molécule d'eau liquide, il se dégage une quantité de chaleur égale à 69 000 calories. L'énergie nécessaire à la destruction d'une molécule sera donc équivalente à **69 000** calories soit :

$$W = 4,18 \times 69\,000 \text{ joules.}$$

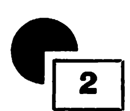
Si e est la force contre-électromotrice cherchée, on a :

$$W = e\,I\,t = e\,Q.$$

Q désignant la quantité d'électricité libérant 2 atomes-grammes d'hydrogène à la cathode : $Q = 96\,500 \times 2$ **coulombs.**

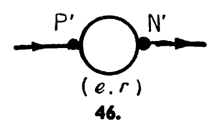
On obtient finalement : $e = \frac{W}{Q} = \frac{4,18 \times 69\,000}{96\,500 \times 2} = 1,49$ **volts.**

Cependant *dans le cas d'une électrolyse avec anode soluble*, si la cathode est au même niveau que l'anode, le phénomène observé se réduit à un simple transport horizontal de l'anode à la cathode; il n'y a ni énergie chimique dépensée ni travail mécanique effectué et le voltamètre *n'aura pas de force contre-électromotrice.*



LOI D'OHM APPLIQUÉE A UN RÉCEPTEUR

■ **72. Différence de potentiel aux bornes d'un récepteur.** —



46.

Soit un récepteur P'N' placé dans un circuit parcouru par un courant I (*fig. 46*). Il reçoit du reste du circuit une puissance totale $(V_{P'} - V_{N'})I$; il la transforme, et la rend sous forme d'effet Joule inutilisé (puissance rI^2, en désignant par r la résistance ohmique intérieure du récepteur), et sous une autre forme ***utilisable*** qui, par définition, vaut $P = e.I$.

On a donc :

$$(V_{P'} - V_{N'})I = rI^2 + eI$$

soit :

$$\boxed{V_{P'} - V_{N'} = rI + e.}$$

On voit que cette différence de potentiel, comptée dans le sens du courant, est la somme de deux termes : la chute ohmique rI et la force contre-électromotrice. Ceci constitue la loi d'Ohm appliquée à un récepteur.

▶ ***Loi d'Ohm.*** *La différence de potentiel aux bornes d'un récepteur parcouru par un courant s'obtient en ajoutant à la chute ohmique* rI *la force contre-électromotrice du récepteur.*

Ce résultat permet de calculer l'une des grandeurs de la relation précédente si on connaît les autres.

● EXEMPLE. — *On applique une tension de 6 volts aux bornes d'un voltamètre à eau acidulée de force contre-électromotrice 1,5 volt et de résistance intérieure 1,75 ohm. Quelle est l'intensité du courant?*

La relation précédente s'écrit :

$$V_{P'} - V_{N'} = e + rI$$
$$6 = 1,5 + 1,75\,I$$
$$I = \frac{6 - 1,5}{1,75}$$
$$I = 2,56 \text{ ampères.}$$

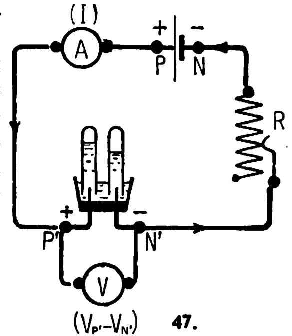
■ 73. Conditions de fonctionnement d'un récepteur. — Nous distinguerons deux cas : le moteur et le voltamètre.

Pour un moteur, la résistance r est généralement faible et, le moteur étant au repos, $e = 0$; l'intensité I risque d'être trop grande lorsqu'on branche ce moteur sous la tension normale d'utilisation. Aussi met-on en série avec le moteur un rhéostat, appelé *rhéostat de démarrage* qui diminue l'intensité au début; au fur et à mesure que la vitesse du moteur augmente, e croît, et pour conserver à I une valeur convenable, on diminue la résistance du rhéostat.

Prenons maintenant un voltamètre : la valeur de e dépend uniquement de sa constitution et si la différence de potentiel aux bornes est inférieure à e, *il ne peut pas y avoir électrolyse* et il ne passe aucun courant dans le circuit.

▶ *Il ne peut y avoir électrolyse que si la différence de potentiel aux bornes du voltamètre est au moins égale à sa force contre-électromotrice.*

■ 74. Vérifications expérimentales. — Montons en série (*fig. 47*) un générateur, un voltamètre à eau acidulée, un rhéostat R; plaçons en dérivation sur les bornes P′N′ du voltamètre un voltmètre qui indiquera la différence de potentiel aux bornes du voltamètre : $V_{P'} - V_{N'}$. Le rhéostat R permet de faire varier l'intensité I qui traverse le circuit; on constate alors que $V_{P'} - V_{N'}$ varie.



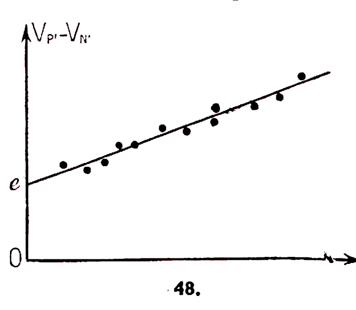
47.

Portons sur deux axes rectangulaires, l'intensité I en abscisses, la différence de potentiel $V_{P'} - V_{N'}$ en ordonnées. Nous

obtenons une droite (*fig.* 48) de pente positive : $V_{P'} - V_{N'}$ est fonction croissante de I ; cette droite ne passe pas par l'origine. Cette droite représente la fonction :

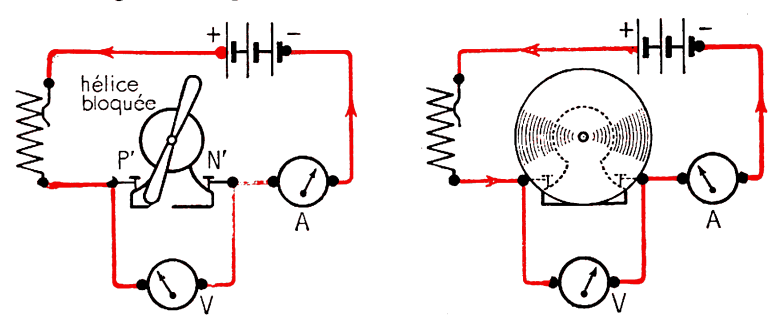
$$V_{P'} - V_{N'} = e + rI$$

L'ordonnée à l'origine e mesure la force contre-électromotrice du voltamètre à eau acidulée (on trouverait ici 1,5 volt) ; la pente *r* de la droite mesure la résistance intérieure du voltamètre.



48.

Une expérience analogue fort instructive est faite avec un moteur (de ventilateur par exemple) (*fig.* 49). Calons l'hélice du ventilateur ; le moteur ne tournant pas se comporte comme une résistance pure. Laissons le moteur tourner : nous constatons que l'indication de l'ampèremètre diminue et celle du voltmètre augmente. Agissons sur le rhéostat pour maintenir la même



49. Variations de l'intensité et de la différence de potentiel dans un moteur arrêté ou en mouvement.

intensité ; nous obtenons une différence de potentiel bien supérieure à celle obtenue lorsque le moteur était arrêté :

Moteur arrêté : $V_{P'} - V_{N'} = rI$

Moteur en marche : $V_{P'} - V_{N'} = rI + e$.

Ces vérifications peuvent faire le sujet de travaux pratiques.

■ **75. Rendement d'un récepteur.** — Nous avons vu que le récepteur consomme une puissance totale $P_1 = (V_{P'} - V_{N'})I$ pour ne rendre qu'une puissance utilisable $P_2 = eI$. Son *rendement* est :

$$\rho = \frac{P_2}{P_1} = \frac{eI}{(V_{P'} - V_{N'})I} = \frac{e}{rI + e} < 1.$$

Il est d'autant plus grand que *r*I est plus petit : faible résistance et faible intensité de courant. En particulier, si deux régimes de courant sont possibles pour obtenir avec un moteur une même énergie, il convient de choisir le régime à faible intensité.

◀ RÉSUMÉ ▶

On donne le nom de ***récepteurs*** *à des appareils qui, parcourus par un courant électrique, fournissent de l'énergie sous une autre forme que de la chaleur.*

Un récepteur est caractérisé par sa ***force contre-électromotrice*** *qui s'exprime par le quotient des nombres mesurant la puissance fournie par le récepteur autrement que par effet Joule et l'intensité du courant qui traverse ce récepteur. On a donc :*

$$\mathbf{W = e.Q} \quad \text{ou} \quad \mathbf{W = e.I.t} \quad \text{ou} \quad \mathbf{P = e.I}$$

La ***loi d'Ohm appliquée à un récepteur*** *exprime que la différence de potentiel aux bornes du récepteur s'obtient en ajoutant à la chute ohmique* rI *la force contre-électromotrice du récepteur.*

$$\mathbf{V_{P'} - V_{N'} = rI + e.}$$

★ EXERCICES ★

65. — Un moteur fournit une puissance utile de un cheval (ch) lorsqu'il est parcouru par un courant de 7 ampères. Calculer sa f. c. é. m. — **Rép.** : *105 volts.*

66. — Un voltamètre a une force contre-électromotrice égale à 2 volts; il est parcouru par un courant de 5 ampères pendant 10 heures. Calculer l'énergie chimique mise en jeu. Exprimer cette énergie en joules et en watt-heure.

67. — Un moteur consommant 240 watts est parcouru par un courant de 2 ampères; sa résistance intérieure est de 2 ohms. Quelle est sa force contre-électromotrice?
Rép. : *116 volts.*

68. — On établit entre les bornes A et B d'un voltamètre une différence de potentiel variable; il ne se produit aucune électrolyse si $V_A - V_B < 1,6$ volts. Si $V_A - V_B = 3$ volts, on constate que l'intensité de courant est $I = 0,7$ ampère. En déduire la f. c. é. m. et la résistance du voltamètre.

69. — Un voltamètre de f. c. é. m. 1,9 volt est de résistance intérieure 2 Ω est mis en série avec un moteur de résistance intérieure 2 Ω et un rhéostat de 10 Ω. L'ensemble du circuit étant branché sur une différence de potentiel de 120 volts on constate qu'il passe dans le circuit une intensité I = 5 A. Calculer la f. c. é. m. du moteur, la puissance utile de ce moteur, la puissance dissipée par effet Joule dans le circuit total. — **Rép.** : *e = 48,1 volts; p = 240,5 W; p' = 350 W.*

70. — Un moteur fournit une puissance mécanique de 1/6 ch.; il fonctionne sous une différence de potentiel de 110 volts avec une résistance totale de 24 Ω. Calculer l'intensité du courant la plus avantageuse pour obtenir le meilleur rendement. Quelle est alors la f. c. é. m. du moteur?

71. — Entre deux points A et B présentant une différence de potentiel de 20 volts, on branche un moteur de résistance intérieure 2 ohms. Calculer l'intensité du courant lorsque l'on empêche le moteur de tourner. On laisse le moteur tourner, calculer la nouvelle intensité, si la f. c. é. m. du moteur est 15 volts.
Rép. : *10 A; 2,5 A.*

72. — Une prise de courant de 80 volts alimente un moteur dont la résistance intérieure est de 2 ohms et un rhéostat de résistance variable *x* ohms, ces deux appareils étant montés en série.

1° Exprimer en fonction de *x* et de l'intensité I du courant la puissance P utilisable fournie par le moteur.

2° Calculer I en fonction de *x* pour que cette puissance soit maximum. Donner l'expression de cette puissance maximum Pm en fonction de *x* et calculer la valeur de *x* telle que Pm = 200 watts.

3° Quelles sont alors l'intensité du courant, la f. c. é. m. du moteur, la tension entre ses bornes et la différence de potentiel entre les bornes du rhéostat.
Rép. : $P = 80I - (2 + x)I^2$; $x = 6\,\Omega$; *5 A, 40 V, 50 V, 30 V.*

73. — On dispose, entre deux bornes d'une prise de courant, d'une tension constante de 110 volts.

On forme à partir de ces deux bornes, un circuit comprenant une résistance R, un moteur M, une cuve à électrolyse à sulfate de cuivre, avec électrodes en cuivre.

Si l'on empêche le moteur de tourner, il se dépose en 20 minutes 4,262 g de cuivre à la cathode.

Quand le moteur tourne il s'en dépose la même quantité en 38 minutes. On demande :

a) Quelle est la résistance totale du circuit;

b) la force contre-électromotrice du moteur et sa puissance.

Masse atomique du cuivre : 63,6. Valence : 2.

Rép. : *10,2 Ω; 52,3 V; 296 W.*

74. — On met en série une résistance R de 5 ohms plongée dans un calorimètre avec un moteur. Lorsqu'on empêche le moteur de tourner, on constate dans R un dégagement de chaleur égal à 5 760 calories en 5 minutes. Cette quantité est réduite à 360 calories lorsque le moteur fonctionne. Calculer les intensités du courant dans les deux cas. La différence de potentiel aux bornes du circuit étant constante et égale à 40 volts, calculer la résistance du moteur, sa f. c. e. m. et la différence de potentiel aux bornes du moteur.

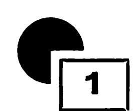
75. — On branche en série sur une prise de courant de 110 volts : un moteur de f. c. é. m. 104 volts, deux voltamètres ayant chacune une f. c. é. m. 1,5 volt et une résistance 0,4 ohm. Calculer l'intensité du courant si la résistance du moteur est 0,2 ohm. — **Rép.** : I = *3 A.*

76. — Le fusible placé devant une prise de courant de 110 volts fond lorsque l'intensité dépasse 5 ampères. Combien de lampes à incandescence de 40 watts pourra-t-on mettre en circuit et comment faudra-t-il les brancher si, sur le culot de la lampe, on lit : 110 volts-40 watts. — **Rép.** : *13 lampes; en dérivation.*

CHAPITRE IX

GÉNÉRATEURS. LOI DE POUILLET

1. Force électromotrice d'un générateur.
2. Différence de potentiel aux bornes : loi d'Ohm.
3. Loi de Pouillet.



FORCE ÉLECTROMOTRICE D'UN GÉNÉRATEUR

76. Générateurs. — Nous avons appelé *générateur* un appareil qui, placé dans un circuit, produit un courant électrique. Le générateur possède deux pôles P et N entre lesquels il existe une différence de potentiel même en l'absence de circuit extérieur; nous avons appelé pôle positif le pôle de sortie du courant P; donc $V_P - V_N > 0$.

Le générateur lance dans le circuit un courant qui transporte de l'énergie.

Cette énergie ***n'est d'ailleurs pas créée*** par le générateur; aucun système ne crée de l'énergie, il ne fait que ***transformer*** une forme d'énergie dans une autre. Revoyons en effet les générateurs les plus simples : piles hydroélectriques, dynamos.

Dans une pile hydroélectrique des *réactions chimiques* se produisent lorsque la pile débite un courant. *La pile transforme de l'énergie chimique en énergie électrique.*

Une dynamo ne fonctionne que si elle est actionnée par un moteur; il faut la faire tourner, il faut dépenser un *travail mécanique* pour produire le courant électrique. La dynamo transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

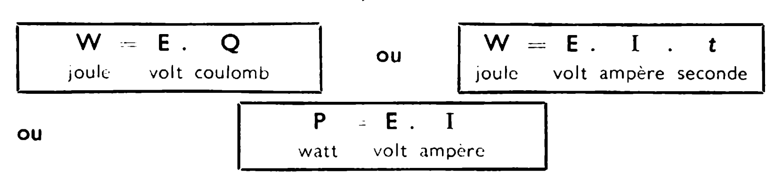
¶ **Remarque :** L'origine de l'énergie dans les piles est souvent plus complexe et nous ne pouvons dans cette classe insister sur les transformations possibles de cette énergie.

77. Force électromotrice. — Ne nous occupons plus de quelle façon le générateur reçoit de l'extérieur l'énergie qu'il doit transformer.

En un temps donné le générateur fournit à la quantité d'électricité Q qui le traverse une certaine énergie W. Nous poserons que cette énergie est proportionnelle à Q : $W = EQ$.

W représente l'***énergie totale*** mise en jeu dans tout le circuit générateur compris.

La grandeur E est une caractéristique du générateur considéré; on l'appelle sa ***force électromotrice,*** ou en abrégé : f. é. m. On remarque qu'elle s'exprime par le quotient d'un nombre de joules par un nombre de coulombs, comme une différence de potentiel ou une force contre-électromotrice; son unité est donc le ***volt.***



▶ *La force électromotrice d'un générateur, exprimée en volts, est égale au quotient du nombre qui mesure l'énergie* ***totale*** *mise en jeu par le générateur, exprimée en joules, par le nombre qui mesure la quantité d'électricité débitée exprimée en coulombs.*

Voici quelques ordres de grandeur des f. é. m. usuelles :

Piles hydroélectriques : 1 à 2 volts.

Accumulateurs au plomb : 2 volts par élément.

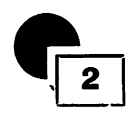
Dynamos : très variable, depuis quelques volts jusqu'à plusieurs milliers de volts; pour une dynamo donnée, E dépend de I.

¶ **Remarque :** L'expression *force électromotrice*, consacrée par l'usage, constitue un tout et cette grandeur n'a rien à voir avec une force.

● EXEMPLE. — *Un moteur de 1 cheval-vapeur fait tourner une dynamo qui débite un courant de 25 ampères; quelle est la force électromotrice de cette dynamo? On néglige les pertes de puissance par suite des frottements.*

Un cheval-vapeur vaut **736** watts; on a immédiatement :

$$736 = E \times 25$$
$$E = 29{,}4 \text{ volts.}$$



DIFFÉRENCE DE POTENTIEL AUX BORNES D'UN GÉNÉRATEUR LOI D'OHM

■ **78. Valeur de la différence de potentiel aux bornes.** — Réalisons un circuit quelconque comprenant un générateur (*fig. 50*). Si $V_P - V_N$ est la différence de potentiel aux bornes et I l'intensité, nous savons que la puissance ***disponible à l'extérieur*** à partir des bornes a pour valeur : $(V_P - V_N)\,I$.

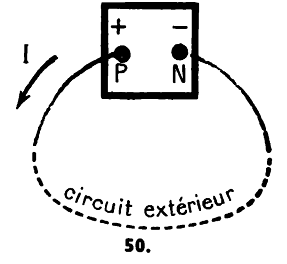
D'autre part, le générateur met en jeu une puissance totale EI;

une partie de cette puissance est dissipée sous forme d'effet Joule à l'intérieur du générateur (bobines de la dynamo, électrolyte d'une pile ou d'un accumulateur), et a pour valeur rI^2, si r est la résistance intérieure du générateur; le reste est disponible dans le circuit. On a donc :

$$EI = rI^2 + (V_P - V_N)I$$

d'où :

$$\boxed{V_P - V_N = E - rI.}$$



50.

On remarque que $V_P - V_N < E$, sauf si la résistance intérieure du générateur est négligeable ($r = 0$), ou si le générateur ne débite pas de courant ($I = 0$).

▶ ***Loi d'Ohm** : La différence de potentiel aux bornes d'un générateur est toujours inférieure à sa force électromotrice, d'une quantité égale à la chute ohmique à l'intérieur de ce générateur. Celle-ci est nulle si le générateur ne débite pas de courant ou si sa résistance intérieure est nulle.*

● EXEMPLE. — *La différence du potentiel aux bornes d'un générateur de f. é. m. 2 volt, est égale à 1,98 volt lorsque ce générateur débite un courant de 0,8 ampère. Calculer la résistance intérieure du générateur.*

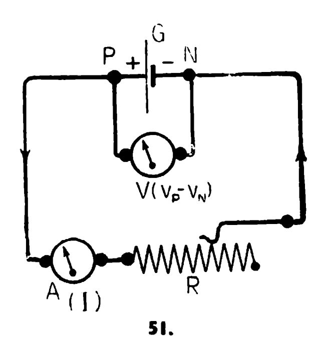
On applique la relation : $V_P - V_N = E - rI$

$$1{,}98 = 2 - r \times 0{,}8.$$

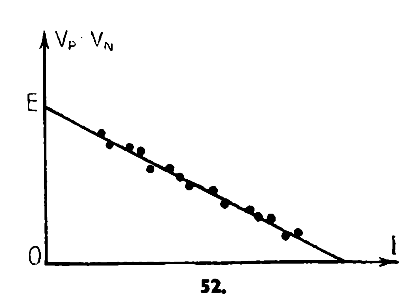
$$r = \frac{2 - 1{,}98}{0{,}8} \quad \text{d'où :} \quad r = 0{,}025 \text{ ohm.}$$

■ **79. Expérience.** — Montons en série (*fig. 51*) une pile G de f. é. m. constante, un ampèremètre A, et un rhéostat R. Plaçons en dérivation aux bornes du générateur P(+) et N(—) un voltmètre : nous pouvons mesurer l'intensité I et la différence de potentiel aux bornes du générateur pour différentes valeurs de la résistance R. Traçons ainsi la courbe obtenue en portant en abscisses l'intensité I et en ordonnée $V_P - V_N$. Nous obtenons une droite de pente négative (*fig. 52*) : pour $I = 0$, la différence de potentiel aux bornes est $V_P - V_N = E$, force électromotrice du générateur.

L'équation de cette droite est en effet : $V_P - V_N = E - rI$; sa pente

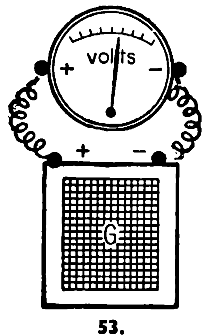


51.



52.

— r permet de mesurer approximativement la résistance intérieure r du générateur G.



53.

■ 80. Mesure approchée d'une f. é. m. —

Branchons un voltmètre aux bornes d'un générateur G (*fig. 53*). Si le voltmètre a une très grande résistance, le courant qui le traverse est très faible, le terme rI est alors négligeable devant E et on peut écrire $V_P - V_N \# E$.

On a ainsi rapidement une valeur très approchée de la force électromotrice.

● EXEMPLE. — *Un voltmètre de résistance* $R = 400\ \Omega$, *branché aux bornes d'un générateur, indique une différence de potentiel de 2 volts. Calculer la valeur exacte de la f.é.m. du générateur, dont la résistance intérieure est* $0,1\ \Omega$.

Le courant qui passe dans le voltmètre est I tel que $V_P - V_N = RI$, d'où

$$I = \frac{2}{400} = \frac{1}{200}\ \text{A}.$$

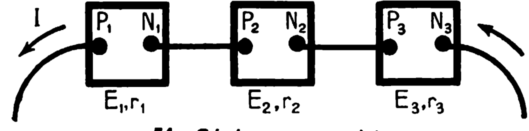
La formule $V_P - V_N = E - rI$ donne alors

$$E = (V_P - V_N) + rI = 2 + 0,1 \times \frac{1}{200} = 2,0005 \text{ volts}.$$

On voit que la lecture directe **E = 2 volts** donne une valeur d'une précision presque toujours suffisante.

■ 81. Générateurs en série ou en opposition. —

Soit plusieurs générateurs E_1, r_1; E_2, r_2; E_3, r_3 montés ***en série***, c'est-à-dire de façon que le pôle positif de l'un soit relié au pôle négatif du suivant (*fig. 54*) ; ils tendent tous à envoyer dans le même sens un courant dans le circuit extérieur. Mais puisqu'ils sont montés en série, un seul et même courant I traverse chacun d'eux. Les puissances totales mises en jeu par chaque générateur valent :



54. Générateurs en série.

$$P_1 = E_1 I$$
$$P_2 = E_2 I$$
$$P_3 = E_3 I$$

et la puissance totale P a pour valeur :

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = (E_1 + E_2 + E_3) I.$$

On voit que l'ensemble des trois générateurs ne comporte comme un seul de f. é. m. : $E_1 + E_3 + E_2$.

▶ *Si plusieurs générateurs sont associés en série, leurs forces électromotrices s'ajoutent.*

Les différences de potentiel aux bornes sont :

$$V_{P_1} - V_{N_1} = E_1 - r_1 I$$
$$V_{P_2} - V_{N_2} = E_2 - r_2 I$$
$$V_{P_3} - V_{N_3} = E_3 - r_3 I.$$

Mais les résistances r_1, r_2, r_3 en série s'ajoutent, et pour l'ensemble des générateurs, de bornes P_1 et N_3, on a :

$$V_{P_1} - V_{N_3} = (E_1 + E_2 + E_3) - (r_1 + r_2 + r_3) I.$$

Donc :

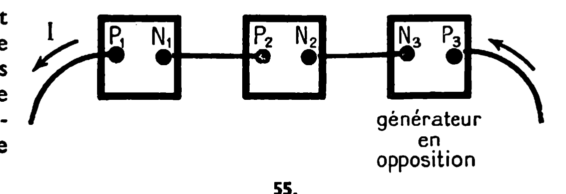
$$V_{P_1} - V_{N_3} = (V_{P_1} - V_{N_1}) + (V_{P_2} - V_{N_2}) + (V_{P_3} - V_{N_3}).$$

Les fils de jonction étant de résistances négligeables :

$$V_{P_2} - V_{N_1} = V_{P_3} - V_{N_2} = 0,$$

et l'égalité ci-dessus se ramène à une identité algébrique. On voit que ***l'on peut opérer avec les différences de potentiel comme si elles étaient de véritables différences, même si le circuit comprend des générateurs.***

Retournons l'un des générateurs pôle pour pôle (*fig. 55*); on dira qu'il est monté ***en opposition*** par rapport aux autres; il tend à envoyer son courant dans le sens inverse du courant des autres générateurs. L'expérience montre qu'il faut *retrancher* sa force électromotrice. Dans le cas de la figure la force électromotrice de l'ensemble est :



55.

$$E_1 + E_2 - E_3.$$

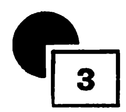
Une résistance négative n'a pas de sens, et la résistance intérieure de l'ensemble est toujours : $r_1 + r_2 + r_3$.

Un générateur inversé se comporte comme un récepteur de force contre-électromotrice égale à E.

Le courant traversera ce générateur en sens contraire du sens normal si sa f. é. m. est plus petite que la f. é. m. globale des autres. Sinon, c'est lui qui imposera le sens du courant, et ce sont alors les autres générateurs qui devront être considérés comme montés en opposition.

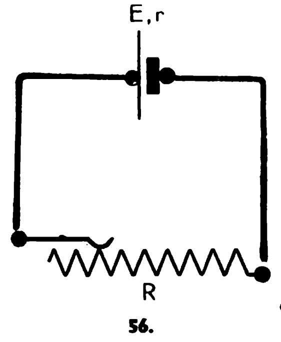
▶ *Quand un générateur est monté en opposition, il faut retrancher sa force électromotrice; il se comporte alors comme un récepteur de f. c. é. m. égale à* E.

Ainsi dans l'exemple figuré, si $E_1 = 10$ volts, $E_2 = 5$ volts, $E_3 = 8$ volts, l'ensemble se comporte comme un générateur de même polarité que E_1 et E_2 et de f. é. m. égale à 7 volts.



LOI DE POUILLET

■ **82. Circuit ne comprenant pas de récepteur.** — Soit un générateur E, r, débitant dans une résistance pure R (*fig. 56*). L'intensité du courant est I. La puissance totale mise en jeu par le générateur est :



56.

$$P = EI.$$

Puisqu'il n'y a pas de récepteur, elle est tout entière dissipée par effet Joule :

$P_1 = rI^2$ dans le générateur
$P_2 = RI^2$ dans la résistance.

Écrivons que : $P = P_1 + P_2$

$$EI = rI^2 + RI^2$$

d'où : $\boxed{E = (r + R)I}$

(loi de Pouillet).

¶ **Remarques. 1.** En 1837, le physicien français **Pouillet** établit expérimentalement cette loi, et lui donne une forme pratique; il reconnaît en particulier que les piles introduisent dans le circuit une résistance intérieure et il précise définitivement la notion de résistance.

2. On peut écrire la formule :

$$I_A = \frac{\text{cause de production du courant en volts (E)}}{\text{résistance totale en ohms } (R + r).}$$

● EXEMPLE. — *Un circuit comprend un générateur défini par* E = 2,5 *volts*, $r = 0{,}2\ \Omega$, *une résistance* extérieure R = 4,8 Ω. *Calculer l'intensité du courant ainsi que la différence de potentiel aux bornes du générateur.*

La résistance totale du circuit est : **4,8 + 0,2 = 5 Ω.**

L'intensité I est donc $I = \dfrac{\text{f.é.m E}}{\text{Résistance totale}}.$

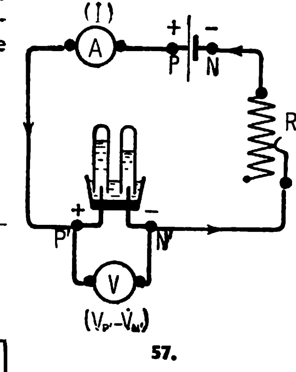
$$I = \frac{2{,}5}{5} = 0{,}5\ \text{A}.$$

La différence de potentiel aux bornes du générateur est alors :

$$V_P - V_N = E - rI$$
$$V_P - V_N = 2{,}5 - 0{,}2 \times 0{,}5 = 2{,}4 \text{ volts}.$$

On comprend l'utilisation d'un rhéostat dans un circuit : en agissant sur le rhéostat, on modifie la résistance du circuit, d'où une modification de l'intensité.

83. Circuit comprenant un récepteur. — Reprenons le même raisonnement lorsque le circuit comprend un récepteur (*fig. 57*). Le générateur fournit une puissance totale : $P = EI$ qui se décompose ainsi :



57.

effets Joule $\begin{cases} \text{générateur} & = rI^2 \\ \text{récepteur} & = r'I^2 \\ \text{résistance} & = RI^2 \\ \text{ampèremètre} & = \rho I^2 \end{cases}$

puissance utilisable fournie par le récepteur : eI.

On a donc :

$$EI = (r + r' + R + \rho)I^2 + eI$$

soit :

$$\boxed{E - e = (r + r' + R + \rho)I.}$$

On peut encore écrire, en comptant la force contre-électromotrice comme une cause négative de production de courant :

$$I_A = \frac{\text{cause de production du courant en volts } (E - e)}{\text{résistance totale en ohms}}.$$

Remarquons que e *se soustrait* de E, ce qui justifie l'appellation de force contre-électromotrice. Lorsqu'un générateur est *placé en opposition* avec un autre générateur dans un même circuit, *il se comporte donc comme un récepteur* puisqu'il faut soustraire sa force électromotrice.

● EXEMPLE. — *Supposons que, dans le cas de figure,* $E = 6$ *volts,* $e = 1{,}5$ *volt,* $R = 4$ *ohms,* $\rho = 0{,}2$ *ohm,* $r = 5{,}7$ *ohm et* $r' = 0{,}1$ *ohms. Calculer* **I**.

La résistance totale du circuit est :

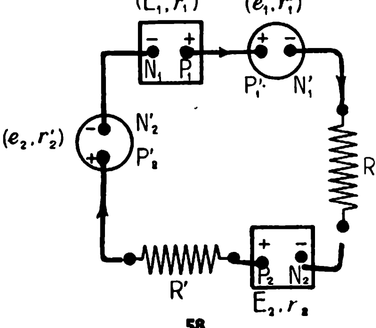
$$R_1 = 4 + 0{,}2 + 5{,}7 + 0{,}1 = 10 \text{ ohms.}$$

On en déduit

$$I = \frac{E - e}{R_1} = \frac{6 - 1{,}5}{10} = 0{,}45.$$

$$I = 0{,}45 \text{ ampère.}$$

84. Cas général. — Réalisons un circuit (*fig. 58*) comprenant plusieurs générateurs, plusieurs récepteurs et diverses résistances; nous prendrons soin de compter comme récepteurs les générateurs montés en opposition, s'ils n'imposent pas le sens du courant.



58.

Dans le cas de figure, la puissance totale mise en jeu vaut :

$$P = (E_1 + E_2)I.$$

Elle se décompose en effets Joule qui consomment une puissance :

$$P_1 = (r_1 + r_2 + r'_1 + r'_2 + R + R')I^2$$

et en une puissance utilisable fournie par les récepteurs :

$$P_2 = (e_1 + e_2)\,I.$$

On a donc :

$$P = P_1 + P_2$$

$$(E_1 + E_2)\,I = (r_1 + r_2 + r'_1 + r'_2 + R + R')\,I^2 + (e_1 + e_2)\,I$$

soit :

$$E_1 + E_2 - e_1 - e_2 = (r_1 + r_2 + r'_1 + r'_2 + R + R')\,I.$$

D'une façon générale, si $\Sigma(E)$ est la somme de toutes les f. é. m., $\Sigma(e)$ celle de toutes les f. c. é. m., $\Sigma(R)$ celle de toutes les résistances :

$$\boxed{\Sigma(E) - \Sigma(e) = I\Sigma(R).}$$

◀ RÉSUMÉ ▶

Si un générateur débitant une quantité d'électricité Q coulombs met en jeu dans le circuit une énergie ***totale*** *W joules, sa force électromotrice E en volts est définie par :*

$$\boxed{W = E.Q} \quad ou \quad \boxed{W = E.I.t} \quad ou \quad \boxed{P = E.I}$$

La ***différence de potentiel aux bornes*** *d'un générateur de résistance intérieure r, est donnée par la* ***loi d'Ohm.***

$$\boxed{V_P - V_N = E - rI.}$$

Elle est toujours inférieure à la f. é. m., sauf si le générateur ne débite pas de courant ou si la résistance intérieure est négligeable.

Quand un générateur débite dans un circuit comprenant seulement une résistance, l'intensité du courant est donné par la ***loi de Pouillet :***

$$\boxed{E = (r + R)I}$$

Si plusieurs générateurs sont placés en série, leurs forces électromotrices s'ajoutent.
Si l'un deux est en opposition, sa force électromotrice se retranche.

Plus généralement, et à condition de compter comme récepteurs les générateurs qui fonctionneraient en opposition :

$$\boxed{\Sigma(E) - \Sigma(e) = I.\Sigma(R).}$$

★ EXERCICES ★

77. — Un circuit comprend un générateur de f. é. m. 2 volts, de résistance intérieure 0,1 ohm, et une résistance de 3,9 ohms. Calculer l'intensité du courant, ainsi que la différence de potentiel aux bornes du générateur.

78. — Dans l'expérience de la *figure 51*, on lit une première fois $V_P - V_N = 9{,}8$ volts et $I = 1$ ampère, et une autre fois $V_P - V_N = 9{,}6$ volts et $I = 2$ ampères. Calculer E supposé constant et *r*. Quelle est dans chaque cas la valeur de la résistance R du rhéostat?

Rép. : *10 v; 0,2 Ω; 9,8 Ω et 4,8 Ω.*

79. — Un générateur de f. é. m. 5 volts débite un courant de 1 ampère dans une résistance extérieure R, et un courant de 0,505 ampère dans une résistance extérieure 2 R. Calculer la résistance intérieure *r* de ce générateur.

80. — On monte en série un générateur (E, *r*) un récepteur (e, r'), un rhéostat R. Donner l'expression de l'intensité du courant I puis de $\frac{1}{I}$. Quelle courbe obtient-on en portant en abscisses les valeurs de R, en ordonnées $\frac{1}{I}$? Construire cette courbe pour : E = 3 volts; $r = 0{,}2\ \Omega$; e = 2 volts; $r' = 1{,}8\ \Omega$. On fera varier R de 0 à 10 ohms.

81. — Un petit moteur de f. c. é. m. 10 volts et de résistance intérieure 1 ohm, est alimenté par 3 générateurs identiques montés en série et de résistance intérieure négligeable. L'intensité du courant est de 2 ampères. Calculer la f. é. m. de chaque générateur. — **Rép.** — *4 volts.*

82. — Trois piles identiques de f. é. m. 1,5 volt chacune et de résistance intérieure 0,5 ohm chacune sont montées en série et alimentent un voltamètre à eau acidulée de f. c. é. m. 1,5 volt et de résistance intérieure 1,5 ohm. Calculer l'intensité du courant.

83. — On monte en série 4 générateurs identiques ayant chacun une f. é. m. de 2 volts et une résistance intérieure de 0,2 ohm, un voltamètre de f. c. é. m. 1,5 volt, de résistance 1,2 ohm. Calculer l'intensité du courant. On met un générateur en opposition : quelle est la nouvelle intensité? On met un deuxième générateur en opposition : que se passe-t-il?

84. — Une chute d'eau de 15 mètres de haut débite 1 m^3 par seconde; quelle est sa puissance en kgm/s, en *ch.*; en watts? Elle fait tourner une turbine qui actionne une dynamo, le tout avec un rendement de 0,8. La dynamo débite un courant de 500 ampères. Quelle est sa force électromotrice?

85. — Un voltmètre de grande résistance, relié aux pôles d'une série d'accumulateurs indique 100 volts. Laissant le voltmètre en place, on réunit les pôles de la batterie aux bornes d'une résistance de **x** ohms; le courant qui passe dans la résistance est 25 ampères, et le voltmètre indique alors 50 volts.

Calculer la force électromotrice de la série d'accumulateurs, la résistance **x** et la résistance intérieure **y** de cette série d'accumulateurs.

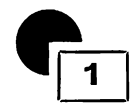
86. — Une batterie d'accumulateurs a une f. é. m. de 6 volts et une résistance intérieure de 0,01 Ω; on l'utilise pour actionner le démarreur d'une automobile et elle débite alors un courant de 200 ampères. Calculer la différence de potentiel entre ses bornes.

87. — Un circuit comprend : un générateur E = 4 V, $r = 0{,}1\ \Omega$; un ampèremètre de résistance 0,1 Ω; un fil AB de résistance 5 Ω et un rhéostat de résistance R. Un voltmètre branché aux bornes de AB indique $V_A - V_B = 2$ v. Quelle est l'intensité indiquée par l'ampèremètre? Quelle est la valeur de R? — **Rép. :** *0,4; 4,8 Ω.*

CHAPITRE X

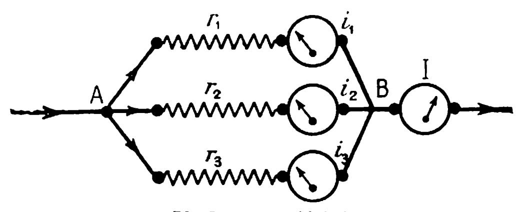
COURANTS DÉRIVÉS

1. Résistances en dérivation.
2. Groupement des générateurs.



RÉSISTANCES EN DÉRIVATION

85. Loi des intensités. — Entre deux points A et B d'un circuit (*fig. 59*), montons ***en dérivation*** ou ***en parallèle*** plusieurs résistances r_1, r_2, r_3 : elles ont toutes mêmes extrémités A et B. Des ampèremètres intercalés sur chaque dérivation mesurent les intensités i_1, i_2, i_3 des courants dans chaque résistance; un autre ampèremètre mesure le courant I dans le circuit principal. On constate que, dans tous les cas, on a :



59. Courants dérivés.

$$I = i_1 + i_2 + i_3.$$

▶ **Loi.** *La somme des intensités dans chaque dérivation est égale à l'intensité dans le circuit principal.*

Remarquons que cette loi ne fait que traduire le fait suivant : il n'y a pas d'accumulation d'électricité aux points A et B. Toute l'électricité qui arrive en A se répartit entre les dérivations.

86. Répartition d'un courant entre plusieurs résistances mortes en parallèle. — Nous admettrons que la différence de potentiel entre les deux points A et B du circuit précédent (*fig. 59*) est la même quelle que soit la dérivation envisagée. C'est le *principe de l'unicité de la différence de potentiel entre deux points d'un circuit.*

Nous pouvons alors écrire les relations d'Ohm : $r_1 i_1 = r_2 i_2 = r_3 i_3$, ou encore : $\frac{i_1}{\left(\frac{1}{r_1}\right)} = \frac{i_2}{\left(\frac{1}{r_2}\right)} = \frac{i_3}{\left(\frac{1}{r_3}\right)}$ rapports qui expriment la proportionnalité des intensités aux inverses des résistances, d'où le résultat :

▶ *Les intensités des courants dans plusieurs résistances mortes (ou résistances pures) en parallèles sont* ***inversement proportionnelles*** *aux résistances correspondantes.*

● EXEMPLE. — *En A (fig. 59) arrive un courant de 15 ampères qui se répartit dans trois résistances $r_1 = 2\Omega$ $r_2 = 5\Omega$ $r_3 = 8\Omega$. Calculer les intensités i_1, i_2, i_3.*

Écrivons que les intensités sont inversement proportionnelles aux résistances ou encore sont proportionnelles aux inverses des résistances :

$$\frac{i_1}{\frac{1}{2}} = \frac{i_2}{\frac{1}{5}} = \frac{i_3}{\frac{1}{8}} \qquad \text{avec} \qquad i_1 + i_2 + i_3 = 15$$

On résout facilement en remarquant que des rapports égaux sont encore égaux au rapport obtenu en prenant comme numérateur la somme des numérateurs et comme dénominateur la somme des dénominateurs :

$$\frac{i_1}{\frac{1}{2}} = \frac{i_2}{\frac{1}{5}} = \frac{i_3}{\frac{1}{8}} = \frac{i_1 + i_2 + i_3}{\frac{1}{2} + \frac{1}{5} + \frac{1}{8}} = \frac{15}{\frac{33}{40}}.$$

On en déduit facilement :

$$i_1 = \frac{100}{11} = 9{,}0 \text{ A}; \quad i_2 = \frac{40}{11} = 3{,}64 \text{ A}; \quad i_3 = \frac{25}{11} = 2{,}3 \text{ A}.$$

¶ **Remarque :** On pourrait songer à vérifier expérimentalement l'égalité des produits $r_1 i_1$, $r_2 i_2$, $r_3 i_3$, mais le principe de l'unicité de la différence de potentiel entre deux points est plus général : on l'admet quels que soient les circuits dérivés placés entre A et B.

■ **87. Résistance équivalente. — Il est commode de chercher à remplacer plusieurs résistances placées en dérivation par une résistance unique, appelée *résistance équivalente.***

▶ ***Définition.*** *On appelle* ***résistance équivalente*** *la résistance unique qui, mise à la place de plusieurs résistances montées en dérivation entre deux points* **A** *et* **B**, *conserve la même intensité et la même différence de potentiel entre les deux points* **A** *et* **B** *du circuit.*

Soit R cette résistance; par définition, si on la substituait aux résistances r_1, r_2, r_3, elle serait parcourue par le courant I et la différence de potentiel entre ses extrémités A et B serait la même que dans le circuit actuel. On peut donc écrire :

$$V_A - V_B = RI = r_1 i_1 = r_2 i_2 = r_3 i_3.$$

On déduit :

$$I = \frac{V_A - V_B}{R} \qquad i_1 = \frac{V_A - V_B}{r_1}$$

$$i_2 = \frac{V_A - V_B}{r_2} \qquad i_3 = \frac{V_A - V_B}{r_3},$$

d'où, puisque $I = i_1 + i_2 + i_3.$

$$\frac{V_A - V_B}{R} = \frac{V_A - V_B}{r_1} + \frac{V_A - V_B}{r_2} + \frac{V_A - V_B}{r_3}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}.$$

En généralisant le calcul, on obtient :

$$\boxed{\frac{1}{R} = \Sigma\left(\frac{1}{r}\right).}$$

On appelle *conductance* l'inverse de la résistance, elle se mesure en mhos (mho, inverse de ohm).

▶ ***Théorème des conductances.*** *La conductance d'un système de résistances pures montées en dérivation est égale à la somme des conductances de chacune d'elles.*

Remarquons que $\frac{1}{R}$ étant supérieur à l'une quelconque des expressions $\frac{1}{r_1}$, $\frac{1}{r_2}$ ..., R est inférieur à r_1, r_2....

▶ *La résistance équivalente est toujours inférieure à l'une quelconque des résistances placées en dérivation.*

Prenons le cas particulier de *n* résistances égales branchées en parallèle : la résistance équivalente sera telle que :

$$\frac{1}{R} = \frac{n}{r} \qquad \text{ou} \qquad R = \frac{r}{n}.$$

¶ **Remarque :** Si on branche en parallèle plusieurs résistances de même longueur l de même résistivité ρ, mais de sections différentes s_1, s_2, s_3, on obtient pour le calcul de la résistance équivalente :

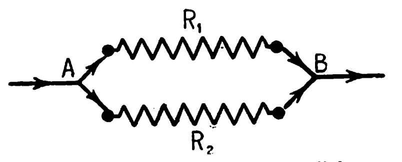
$$\frac{1}{R} = \frac{s_1}{\rho l} + \frac{s_2}{\rho l} + \frac{s_3}{\rho l} = \frac{s_1 + s_2 + s_3}{\rho l}.$$

$$R = \rho \frac{l}{s_1 + s_2 + s_3}.$$

On retrouve ainsi le fait que la résistance est inversement proportionnelle à la section, si l'on admet que ce résultat reste valable quand les fils sont juxtaposés.

■ 88. Cas particulier de deux conducteurs. Partage du courant.

— Soient deux conducteurs en parallèle, de résistance r_1 et r_2 (*fig. 60*); I l'intensité du courant principal, i_1 et i_2 les intensités respectives dans r_1 et r_2, R la résistance équivalente.



60. Deux conducteurs en parallèle.

Nous obtenons :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$$

d'où

$$\boxed{R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}}$$

$RI = r_1 i_1 = r_2 i_2$ d'où : $$i_1 = I . \frac{r_2}{r_1 + r_2}$$

et $$i_2 = I . \frac{r_1}{r_1 + r_2} .$$

● EXEMPLE. — *Un courant de 8 ampères se partage dans 2 dérivations de résistances $R_1 = 7$ ohms, $R_2 = 3$ ohms. Calculer la résistance équivalente et les intensités dans les deux conducteurs :*

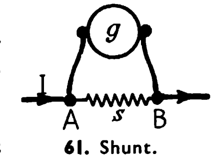
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{7} + \frac{1}{3} = \frac{10}{21} \qquad R = \frac{21}{10} = 2{,}1 \text{ ohms.}$$

La différence de potentiel vaut :

$$RI = R_1 I_1 = R_2 I_2$$
$$2{,}1 \times 8 = 7I = 3I_2$$

d'où $I_1 = 2{,}4$ ampères $I_2 = 5{,}6$ ampères.

■ **89. Shunts des galvanomètres et des ampèremètres.** — Par suite de l'effet Joule, les fils conducteurs qui forment les circuits des galvanomètres et des ampèremètres s'échauffent. Ils ne peuvent supporter qu'une intensité assez faible; si l'intensité dépasse une certaine valeur, ils peuvent fondre ou bien le cadre peut subir un effort trop grand qui provoque la rupture des fils de torsion. Canalisons une certaine partie du courant dans une résistance placée en dérivation aux bornes de l'appareil : nous avons ***shunté*** le galvanomètre; la résistance ainsi placée s'appelle un ***shunt*** (*fig. 61*).



61. Shunt.

Calculons cette résistance s en fonction de la résistance g du galvanomètre de façon qu'il passe dans ce galvanomètre la fraction $\frac{1}{n}$ de l'intensité à mesurer : $i = \frac{I}{n}$.

Le shunt sera alors traversé par l'intensité :

$$I - \frac{I}{n} = I\frac{n-1}{n}.$$

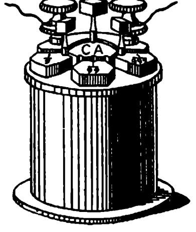
La loi d'Ohm appliquée entre A et B nous donne :

$$V_A - V_B = g . \frac{I}{n} = s . I . \frac{n-1}{n}$$

d'où $$s = \frac{g}{n-1} .$$

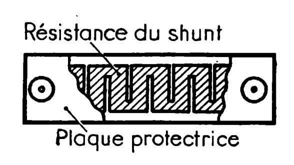
Pour shunter un galvanomètre au $\frac{1}{10}$, on lui adjoint en dérivation une résistance $s = \frac{g}{9}$

au $\frac{1}{100}$, $s = \frac{g}{99}$.



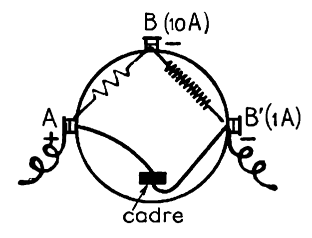
62. Shunt de précision.

Les shunts de précision sont constitués comme des boîtes de résistance (*fig.* 62); les shunts usuels sont formés d'une lame métallique dont on ajuste la résistance par des traits de scie alternés (*fig.* 63) obligeant le courant à suivre un trajet brisé.



63. Shunt usuel.

Les ampèremètres (à cadre notamment) comportent souvent des shunts fixes dans le boîtier (*fig.* 64); un seul appareil peut avoir ainsi plusieurs sensibilités. La borne d'entrée est A; selon que l'on utilise comme borne de sortie B ou B′, l'appareil pourra servir à mesurer des intensités de 10 ampères ou 1 ampère au maximum.



64. Ampèremètre à plusieurs sensibilités à shunts intérieurs.

● EXEMPLE. — *Le cadre d'un ampèremètre a une résistance de 333 ohms et peut supporter un courant de $\frac{1}{1\,000}$ ampère. Quelle doit être la résistance du shunt pour qu'on puisse utiliser cet appareil à la mesure de courants de 1 ampère?*

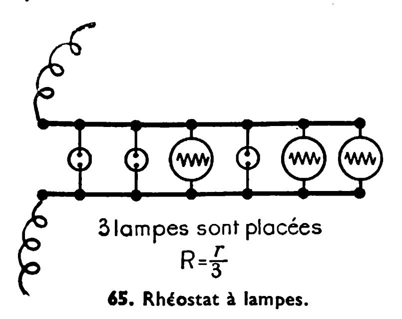
On a : $i = \frac{1}{1\,000}$ A pour $I = 1$.A.

$$\frac{I}{i} = \frac{1}{1\,000} = \frac{1}{n}. \qquad s = \frac{g}{n-1} = \frac{333}{999} = \frac{1}{3} \text{ ohm}$$

$$s = 0{,}3333 \text{ ohm}.$$

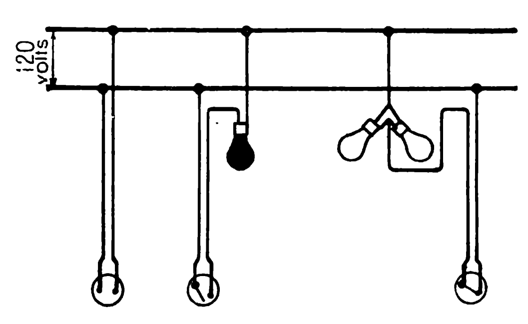
■ **90. Applications.** — On utilise parfois au laboratoire des ***rhéostats à lampes*** (*fig.* 65) : entre deux points A et B du circuit on monte en parallèle un certain nombre de douilles de lampes à incandescence. Si l'on place une lampe, la résistance du rhéostat est *r*; avec 2 lampes identiques, la résistance devient $\frac{r}{2}$, etc.... La résistance d'un tel rhéostat diminue donc lorsque le nombre de lampes augmente.

La plupart des appareils électriques, fers à repasser, lampes à incandescence, réchauds, etc... doivent fonctionner sous une différence de potentiel constante bien déterminée, 120 volts ou 220 volts parfois. Il faudra donc les brancher *en dérivation* sur une ligne reliée au secteur 120 volts par exemple (*fig.* 66). Cette ligne devra avoir une section suffisante car elle sera traversée par la somme des intensités prises par les différents appareils en service. Le *va-et-vient* (*fig.* 67) permet d'allumer ou d'éteindre une lampe de l'un quelconque des interrupteurs K ou K′, quelle que soit la position de l'autre.



65. Rhéostat à lampes.

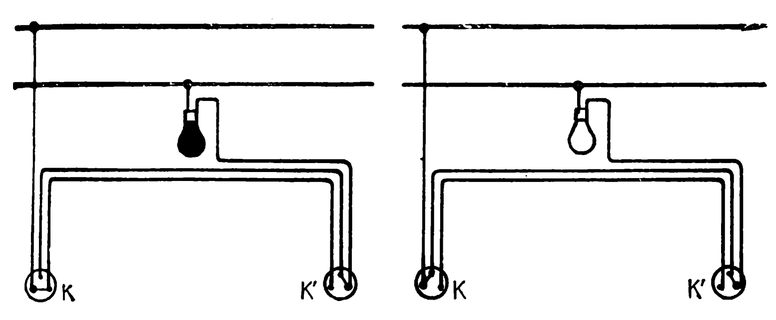
■ **91. Emploi des voltmètres.** — Nous pouvons revenir maintenant sur l'emploi des voltmètres afin de mieux comprendre les caractéristiques de ces appareils de mesure.



66. Schéma d'installation de lampes en **parallèle.**

Nous avons dit au *paragraphe 65* qu'un voltmètre se branchait *en dérivation* entre les deux points A et B d'un circuit quelconque afin de mesurer la différence de potentiel entre ces deux points (*fig. 68*). Le courant I qui arrive en A se partage entre le circuit AB et le voltmètre qui est traversé par un courant *i* d'autant plus faible que sa résistance propre est plus grande.

Nous pouvons conclure que l'introduction d'un voltmètre entre A et B changeant la résistance du circuit modifie la différence de potentiel



67. Schéma d'un **va-et-vient.**

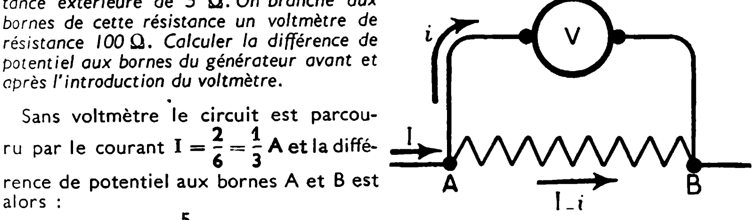
à mesurer, mais d'autant moins que la résistance du voltmètre est plus grande.

Remarquons enfin que le principe d'unicité de la différence de potentiel entre A et B nous permet seul d'affirmer que le produit *ri* indiqué par le voltmètre est bien égal à la différence de potentiel $V_A - V_B$.

● EXEMPLE. — *Un circuit comprend (fig. 69) un générateur de f. é. m. 2 volts, de résistance intérieure 1 Ω, relié à une résistance extérieure de 5 Ω. On branche aux bornes de cette résistance un voltmètre de résistance 100 Ω. Calculer la différence de potentiel aux bornes du générateur avant et après l'introduction du voltmètre.*

Sans voltmètre le circuit est parcouru par le courant $I = \frac{2}{6} = \frac{1}{3}$ A et la différence de potentiel aux bornes A et B est alors :

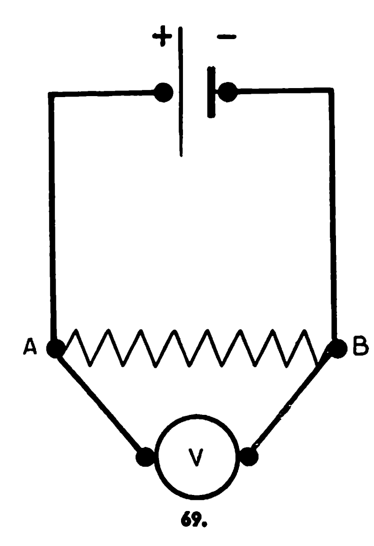
$$V_A - V_B = \frac{5}{3} = 1{,}67 \text{ volt.}$$



68.

Lorsqu'on branche le voltmètre, la résistance entre A et B devient la résistance équivalente :

$$R = \frac{5 \times 100}{105} = \frac{500}{105} \Omega.$$



69.

L'intensité débitée par le générateur est alors :

$$I' = \frac{2}{\frac{500}{105} + 1} = \frac{2 \times 105}{605} = \frac{2 \times 21}{121} \text{A}.$$

Elle se répartit en i_1 dans la résistance 5 Ω et i_2 dans le voltmètre :

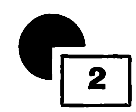
$$i_1 + i_2 = \frac{2 \times 21}{121} \quad 5i_1 = 100i_2 \qquad i_1 = 20i_2$$

d'où : $\quad 21\, i_2 = \frac{2 \times 21}{121} \qquad i_2 = \frac{2}{121}$ A

$$\text{et } V_A - V_B = 100 \times \frac{2}{121} = \frac{200}{121} = 1{,}65 \text{ volt.}$$

L'erreur est de l'ordre de **0,02** volt soit $\frac{1}{80}$ **en valeur relative.**

La résistance du voltmètre est trop faible.



GROUPEMENT DES GÉNÉRATEURS

■ **92. Générateurs en série.** — **Nous savons que les forces électromotrices de générateurs placés en série s'ajoutent ainsi que leurs résistances intérieures.**

▶ ***Quand plusieurs générateurs sont montés en série, la f. é. m. de l'ensemble est égale à la somme des f. é. m. de chacun d'eux; la résistance intérieure de l'ensemble est égale à la somme des résistances de chacun d'eux.***

■ **93. Générateurs identiques groupés en parallèle.** — **Prenons par exemple 3 générateurs *identiques* (E, *r*) montés en parallèle entre les points P et N (*fig. 70*). Le courant se partage évidemment en 3 parties égales : $i = \frac{I}{3}$; pour un générateur nous avons :**

$$V_P - V_N = E - r\frac{I}{3}.$$

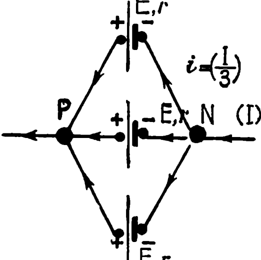
Si E′ est la f. é. m. du générateur unique qui remplacerait les trois précédents, r' sa résistance intérieure, on doit avoir :

$$V_P - V_N = E' - r'I$$

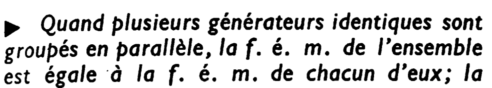
d'où par identification : $E' = E$

$$r' = \frac{r}{3}.$$

Le raisonnement subsisterait pour un nombre quelconque de générateurs.



70. Générateurs en parallèle.



▶ *Quand plusieurs générateurs identiques sont groupés en parallèle, la f. é. m. de l'ensemble est égale à la f. é. m. de chacun d'eux; la résistance intérieure est égale au quotient de la résistance intérieure de l'un d'eux par le nombre de générateurs.*

● EXEMPLE. — *Deux générateurs identiques en parallèle de f. é. m. 1,5 volt, de résistance intérieure 0,20 ohm chacun débitent dans une résistance de 4,9 ohms. Calculer l'intensité du courant dans cette résistance et dans chaque générateur.*

La f. é. m. de l'ensemble est **1,5** volt; la résistance de l'ensemble est $\frac{0,2}{2} = 0,1$ ohm. La résistance totale du circuit est : $4,9 + 0,1 = 5$ ohms.

L'intensité dans la résistance extérieure est :

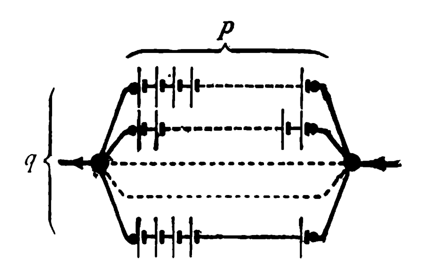
$$I = \frac{E}{R} = \frac{1,5}{5} = 0,3 \text{ ampère.}$$

Chaque générateur est alors traversé par un courant :

$$i = \frac{I}{2} = \frac{0,3}{2} = 0,15 \text{ ampère.}$$

◇ **94. Groupement mixte.** — On peut monter plusieurs séries de générateurs en parallèle les unes avec les autres : c'est le *groupement mixte.*

▶ **Théorème.** *Si on dispose de* **N** *générateurs identiques, le maximum d'intensité que l'on peut obtenir dans une résistance extérieure correspond à un groupement mixte tel que la résistance intérieure de la batterie soit égale à la résistance extérieure.*



71. Groupement mixte de générateurs.

Si chaque générateur est caractérisé par E, r, chaque série (*fig. 71*) aura une force électromotrice pE, une résistance intérieure pr. Les q séries ainsi constituées et montées en parallèles, donneront un groupement de f. é. m. pE et de résistance

intérieure $\frac{pr}{q}$. Si R est la résistance extérieure, l'intensité du courant dans cette résistance vaudra :

$$I = \frac{pE}{R + \frac{pr}{q}} \quad \text{ou} \quad \frac{E}{\frac{R}{p} + \frac{r}{q}}.$$

Le dénominateur est une somme de deux termes dont le produit est constant : $\frac{R}{p} \times \frac{r}{q} = \frac{Rr}{N}$, N étant le nombre de générateurs donnés. Il sera minimum quand ces termes sont égaux :

$$\frac{R}{p} = \frac{r}{q}, \quad \text{soit :} \quad R = \frac{pr}{q}.$$

Mais il faut que $\frac{r}{N} < R < Nr$.

◇ **95. Circuit complexe.** — L'étude de ces circuits ne faisant pas partie du programme, nous nous contenterons de montrer sur un exemple, sans discussion générale, la méthode utilisée pour traiter des problèmes simples sur ce sujet.

● **EXEMPLE.** — *Un circuit (fig. 72) comprend un générateur de f. é. m. E = 8 volts, de résistance intérieure r = 2 Ω, relié à deux points A et B par deux fils de résistance négligeable. Entre A et B sont branchées deux dérivations constituées l'une par une résistance R = 5 Ω, l'autre par un voltamètre de f. c. é. m. e = 2 volts et de résistance R' = 1 Ω. Calculer l'intensité débitée par le générateur ainsi que les intensités dans chaque dérivation.*

Il faut bien se garder d'appliquer brutalement les lois des dérivations constituées par des résistances pures.

Comme il n'y a pas accumulation d'électricité en A, la loi des intensités subsiste : $I = i_1 + i_2$.

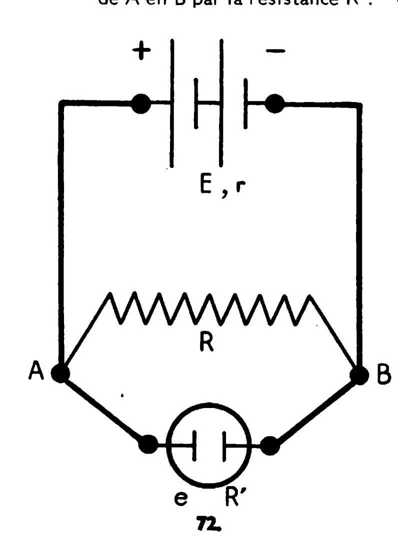
Appliquons le principe de l'unicité de la différence de potentiel entre A et B, en évaluant $V_A - V_B$ de trois façons différentes :

de A en B par le générateur : $V_A - V_B = E - rI$

de A en B par la résistance R : $V_A - V_B = Ri_1$

de A en B par le voltamètre :

$$V_A - V_B = e + R'i_2$$



72.

Numériquement, on obtiendra :

$$V_A - V_B = 8 - 2I = 5\,i_1 = 2 + i_2$$

Comme $I = i_1 + i_2$ on en déduit :

$$8 - 2i_1 - 2i_2 = 5i_1$$

$$\text{ou :} \quad 7i_1 + 2i_2 = 8$$

$$8 - 2i_1 - 2i_2 = 2 + i_2$$

$$\text{ou :} \quad 2i_1 + 3i_2 = 6.$$

La résolution numérique de ces équations donne alors :

$$i_1 = \frac{12}{17} = 0{,}70 \text{ A}; \quad i_2 = \frac{26}{17} = 1{,}53 \text{ A}$$

$$\text{et } I = \frac{38}{17} = 2{,}23 \text{ A}.$$

Résumons la méthode : pas d'accumulation d'électricité aux points de bifurcation ou *nœuds* de courant; principe de l'unicité de la différence de potentiel entre deux nœuds quel que soit le chemin suivi.

◀ RÉSUMÉ ▶

Lorsque plusieurs résistances pures sont en dérivation, la somme des intensités qui les traversent est égale à l'intensité qui circule dans le circuit principal.

Les intensités des courants dans plusieurs résistances mortes en parallèle sont ***inversement proportionnelles*** *aux résistances correspondantes.*

La résistance équivalente à plusieurs conducteurs montés en dérivation entre deux points A et B est la résistance unique qui, remplaçant ces conducteurs, conserve la même intensité et la même différence de potentiel entre ces points A et B. Elle se calcule au moyen du ***théorème des conductances***

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots$$

Le ***shunt*** *d'un galvanomètre ou d'un ampèremètre est une résistance mise* ***en dérivation*** *entre les bornes de l'appareil. Sa valeur est* $s = \frac{g}{n-1}$ *si l'ampèremètre n'est traversé que par la fraction* $\frac{I}{n}$ *du courant principal.*

Quand des générateurs sont montés en série, leurs f. é. m. et leurs résistances intérieures s'ajoutent. Quand n générateurs identiques sont montés en parallèle, la f. é. m. de l'ensemble est égale à celle de chacun d'eux et la résistance intérieure est $\frac{r}{n}$, *r étant la résistance de l'un d'eux.*

★ EXERCICES ★

88. — Calculer la résistance équivalente au système formé de 2 résistances de 6 et 4 ohms montées en parallèle. Quelles sont les intensités dans chaque résistance, celle du courant principal étant de 30 ampères? — **Rép.** : *2,4 Ω; 12 A; 18 A.*

89. — Deux résistances de 9 et 13 ohms sont placées en parallèle. La différence de potentiel entre leurs bornes est de 20 volts; quelle est l'intensité du courant principal?

90. — Un rhéostat à lampe peut comporter 3 lampes de 450 ohms; quelles résistances peut-on obtenir? Quelle intensité traverse le rhéostat dans chaque cas, la tension aux bornes étant toujours de 22,5 volts? — **Rép.** : *450 ohms; 225 ohms; 150 ohms. — 0,05 A; 0,1 A; 0,15 A.*

91. — Le cadre d'un galvanomètre a une résistance de 20 ohms; calculer la valeur du shunt tel qu'il faudra multiplier par 100 les indications de l'appareil.

92. — On dispose de 6 piles de f. é. m. 2 volts et de résistance intérieure 0,2 ohm chacune. Calculer la f. é. m. et la résistance intérieure du groupement obtenu quand on les met toutes en série, ou toutes en parallèle?
Rép. : *12 volts; 1,2 ohm; 2 volts 0,033 ohm.*

93. — Quelles sortes de groupement mixtes peut-on obtenir avec les piles précédentes? Calculer dans chaque cas la f. é. m. et la résistance de la batterie.

94. — Une prise de courant de 110 volts alimente 6 lampes montées en dérivation, de 22 bougies chacune, et consomment 0,88 watt par bougie.

1° Quelle est l'intensité du courant passant dans chaque lampe?
2° Quelle est l'intensité du courant débité par la prise?
3° Quelle est la résistance de chaque lampe?
Rép. : *0,176 A; 1,056 A; 625 Ω.*

95. — On monte en série deux piles de f. é. m. de 2 volts chacune et de résistance intérieure négligeable, avec un rhéostat de 8 ohms et enfin un moteur de f. c. é. m. e. et de résistance intérieure *r*. L'intensité du courant est de 0,25 ampère, mais si on empêche le moteur de tourner, elle devient égale à 0,4 ampère. On demande de calculer :
1° La f. c. é. m. e et la résistance *r*.
2° Quelles seraient les intensités des courants obtenus en réalisant les mêmes expériences, mais les piles étant cette fois montées en parallèle?
Rép. : *1,5 v; 2 Ω; 0,05 A; 0,2 A.*

96. — Une batterie d'accumulateurs B de f. é. m. égale à 50 volts, de résistance intérieure 2 Ω, et une batterie B′, de f. é. m. égale à 40 volts et de résistance intérieure 2 Ω également, ont chacune leur pôle positif relié en un point P et leur pôle négatif relié en un point Q.
1° Quelles sont l'intensité du courant et la d. d. p. entre P et Q.
2° On relie ensuite P et Q par une résistance R de 8 Ω. Quelles sont les intensités de courant dans chacun des trois tronçons, ainsi que la d. d. p. entre P et Q?
Rép. : *2,5 A; 45 v; B : $I = 5$ A; B′ : $I' = 0$; 40 V.*

97. — On dispose de deux lampes : 120 V, 40 W et 120 V, 60 W. Calculer l'intensité dans chacune d'elles en service normal. On met les deux lampes en série sous une tension de 240 volts; que se produit-il? Pour éviter cet inconvénient, on se propose de shunter l'une des lampes au moyen d'une résistance R convenable. Indiquer quelle lampe doit être shuntée et calculer la valeur de R.

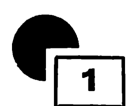
98. — Un milliampèremètre a une résistance de 999 Ω : il est gradué de 0 à 1 mA. Calculer la résistance du shunt nécessaire pour qu'on puisse l'utiliser de 0 à 1 ampère. Quelle est alors la résistance équivalente à l'ensemble shunt milliampèremètre?

99. — Un circuit comprend les différentes parties suivantes :
a) Un générateur de f. é. m. 120 volts, de résistance intérieure 5 Ω.
b) Un rhéostat formé de lampes placées en parallèle, chacune ayant une résistance de 200 ohms.
c) Un voltamètre à eau acidulée, de résistance 5 ohms et de force contre électromotrice 1,6 volt.
Calculer l'intensité du courant qui est débité par le générateur dans les cas suivants :
1° On utilise une seule lampe du rhéostat.
2° On utilise deux lampes du rhéostat.
Rép. : *0,56 A; 1,08 A.*

CHAPITRE XI

*MESURE DES RÉSISTANCES ET DES FORCES ÉLECTROMOTRICES

1. Mesure des résistances.
2. Mesure des forces électromotrices.



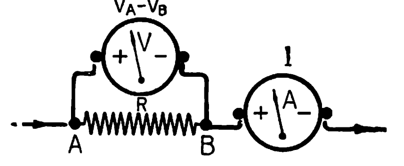
MESURE DES RÉSISTANCES

■ 96. Méthode ampèremètre-voltmètre. — L'emploi d'un ampèremètre et d'un voltmètre permet de trouver rapidement la valeur très approchée d'une résistance. Soit R la résistance à mesurer (*fig. 73*); on la relie à un générateur convenable et on branche entre ses bornes A et B un voltmètre qui mesure $V_A - V_B$. Un ampèremètre placé en série indique l'intensité I. L'application de la loi d'Ohm donne alors :

$$V_A - V_B = RI$$

d'où

$$R = \frac{V_A - V_B}{I}.$$



73. Méthode ampèremètre-voltmètre.

¶ **Remarque :** La valeur I lue à l'ampèremètre est en réalité la somme des intensités parcourant la résistance R et le voltmètre, mais si la résistance du voltmètre est très grande vis-à-vis de celle de R, l'intensité qui traverse R diffère peu de I. La méthode est bonne dans ce cas.

● **EXEMPLE.** — *Dans l'expérience précédente, on lit* V = 40 *volts,* I = 5 *ampères; calculer* R.

On obtient $$R = \frac{40}{5} = 8 \text{ ohms}.$$

■ 97. Méthode du pont de Wheatstone. — Considérons le montage indiqué par la *figure 74* : 4 résistances r_1, r_2, r_3, r_4, sont disposées suivant les 4 côtés d'un losange AMBN. Un générateur, pile ou accumulateur, est branché aux extrémités de la diagonale AB; un ***pont*** est

*Les mesures de résistance et de f. é. m. ne pourront être étudiées qu'en travaux pratiques.

jeté entre M et N et contient un galvanomètre très sensible G. L'expérience montre qu'il est possible de choisir les 4 résistances de façon que le galvanomètre ne soit traversé par aucun courant. On dit alors que le ***pont est équilibré.***

Il passe alors le même courant i dans r_1 et r_2 puisqu'il ne passe rien dans MN; de même le courant i' traverse à la fois r_3 et r_4.

74. Schéma du pont de **Wheatstone.**

Puisqu'il ne passe aucun courant dans MN, on obtient :

$$V_M - V_N = 0$$

d'où $V_A - V_M = V_A - V_N$

et $V_M - V_B = V_N - V_B$

(1) $r_1 i = r_3 i'$

et (2) $r_2 i = r_4 i'$.

Divisons (1) et (2) membre à membre :

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4} \quad \text{ou} \quad \boxed{r_1 r_4 = r_2 r_3.}$$

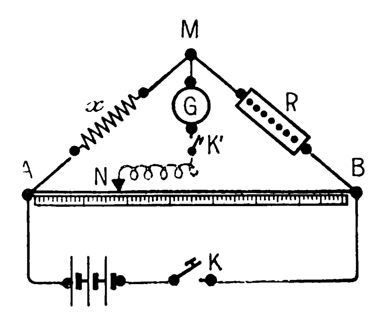
▶ *Quand le pont de Wheatstone est équilibré, les produits des résistances placées en croix sont égaux.*

▶ *Si on connaît trois des résistances à l'équilibre du pont, on peut calculer la quatrième : tel est le principe de la méthode du pont de Wheatstone.*

On peut écrire : $r_1 = r_2 \times \frac{r_3}{r_4}$.

▶ *Si on connaît une résistance et le rapport de deux autres, on peut calculer la quatrième.*

■ **98. Montage du pont à corde.** — Le pont à corde est schématisé par la *figure 75* (à rapprocher de la précédente). r_1 est devenue x, résistance à mesurer; r_2 est une boîte de résistances étalonnées; r_3 et r_4 sont constituées par les portions AN et NB d'un même fil résistant (*corde* de piano) sur lequel glisse le contact mobile N.



75. Montage du **pont à corde.**

Ayant débouché une résistance connue R de la boîte, on déplace le curseur N de façon à obtenir l'équilibre du pont : le galvanomètre doit rester immobile en appuyant sur l'interrupteur K′. On a alors :

$$x r_4 = R r_3$$

ou

$$x = R.\frac{r_3}{r_4}.$$

La corde AB étant homogène et de section constante, on a

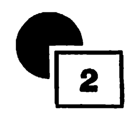
$$\frac{r_3}{r_4} = \frac{AN}{BN}, \qquad \text{d'où} \qquad x = R.\frac{AN}{BN}.$$

La corde AB est tendue devant une règle graduée; une simple lecture donne AN et BN.

¶ **Remarques : 1.** On démontre que la sensibilité est maximum quand le curseur N est au milieu de AB. Pour se rapprocher de cette condition, le curseur étant au milieu de AB, on choisit R de façon à ce que l'équilibre soit à peu près réalisé et on achève le réglage en déplaçant légèrement N.

2. Il convient d'utiliser un galvanomètre très sensible que l'on shuntera au début de l'expérience.

3. On utilise, dans les mesures de grande précision qui peuvent atteindre le $\frac{1}{100\,000}$ une autre méthode dite de la boîte à pont; les 3 résistances r_2, r_3, r_4 sont alors des résistances étalonnées.



MESURE DES FORCES ÉLECTROMOTRICES

■ **99. Méthode d'opposition.** — Réalisons le montage représenté par la *figure 76*. Une batterie d'accumulateurs B débite dans un fil résistant MN; entre M et C, contact mobile sur MN, on branche ***en opposition*** avec le générateur B la pile à étudier et un galvanomètre G. On constate que, pour une certaine position de C il ne passe aucun courant dans G.

La pile P n'est traversée par aucun courant et la différence de potentiel entre ses bornes est égale à sa f. é. m. (§ *78*)

$$V_M - V_C = E.$$

76. Méthode d'opposition.

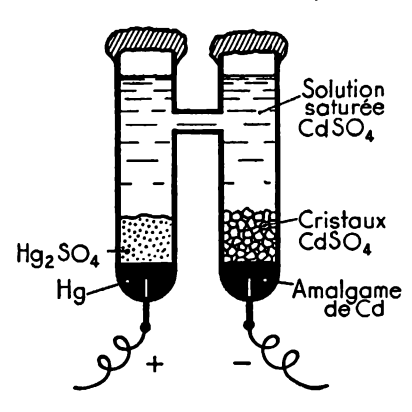
Mais, d'après la loi d'Ohm : $V_M - V_C = RI$, R résistance de MC, I, intensité du courant qui circule dans tout le circuit BMN (le circuit MPC ne joue aucun rôle). Donc :

$$E = RI.$$

Remplaçons la Pile P par une autre P′ de f. é. m. E′; à l'équilibre nous aurons de même : $E' = R'I$

R′ étant la résistance de la portion MC′; l'intensité I n'a pas changé,

d'où : $$\frac{E}{E'} = \frac{R}{R'}.$$



77. Pile étalon **Weston.**

Si le fil MN est homogène et de section constante :

$$\frac{R}{R'} = \frac{MC}{MC'} \quad \text{d'où} \quad \frac{E}{E'} = \frac{MC}{MC'}.$$

Le curseur C se déplaçant devant une règle graduée, on a MC, MC′ par lecture directe.

Si E′ est la f. é. m. d'une pile étalon telle que l'élément Weston, on calcule directement E en volts. La *figure* 77 représente l'élément Weston; sa force électromotrice est, à 20 °C, égale à 1,0186 volt.

◀ *RÉSUMÉ* ▶

La mesure des ***résistances*** *peut se faire par la méthode ampèremètre-voltmètre ou par la méthode* ***du pont de Wheatstone.*** *Quand ce pont est équilibré, les produits des résistances en croix sont égaux :*

$$r_1r_4 = r_2r_3.$$

On utilise souvent le montage du ***pont à corde*** *pour comparer la résistance à mesurer à celles d'une boîte de résistances étalonnées.*

La mesure des forces électromotrices se fait par ***la méthode d'opposition.*** *On compare la force électromotrice à mesurer à celle d'une pile étalon; la f. é. m. de l'élément* ***Weston*** *vaut, à 20 °C, 1,0186 volt.*

★ EXERCICES ★

100. — La corde d'un pont à corde mesure 1 m. Le curseur est a la division 25,2 cm quand le pont est équilibré. La boîte de résistances étalonnées indique 1 496 ohms. Quelle est la valeur de la résistance inconnue? — **Rép.** : *504 ohms.*

101. — La boîte de résistance d'un pont à corde indique 800 ohms, et le curseur est juste au milieu du fil résistant, long de 100 cm, quand le pont est équilibré. Entre quelles limites est comprise la valeur de la résistance inconnue si l'on peut, sans observer une modification de l'équilibre déplacer le curseur de 0,55 mm de part et d'autre de la position ci-dessus?

102. — La résistance inconnue x d'un pont à corde équilibré est à 0° et son coefficient de température est $a = 0{,}004$; le curseur est au milieu de la corde longue de 1 m. Quelle est la température de la résistance x chauffée, s'il faut déplacer le curseur de 1 mm pour maintenir l'équilibre? — **Rép.** : *1°.*

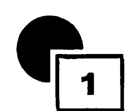
103. — Dans un pont de Wheatstone : $r_1 = 2$ ohms, $r_2 = 5$ ohms, $r_3 = 4$ ohms. Calculer r_4 pour que le pont soit équilibré. Déterminer alors les intensités i et i' des courants dans les branches du pont qui est alimenté par un générateur de 2 volts et de résistance intérieure négligeable.

104. — Dans une comparaison de f. é. m. on trouve : MC = 32,1 cm pour une pile Daniell de f. é. m. 1,07 volt, et MC′ = 46,2 cm par une pile Leclanché dont on demande de calculer la f. é. m. Quelle serait la longueur MC pour un élément Weston?
Rép. : *1,54 volt; 30,55 cm.*

CHAPITRE XII

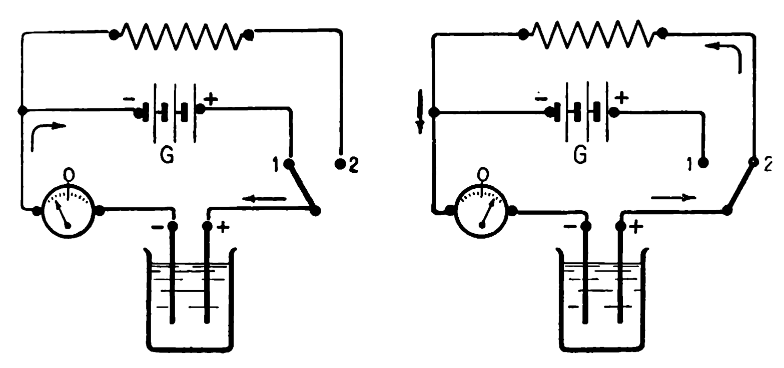
ACCUMULATEURS ET PILES

1. Polarisation des voltamètres.
2. Accumulateurs.
3. Piles hydroélectriques.



POLARISATION DES VOLTAMÈTRES

■ **100. Expérience.** — Réalisons le montage de la *figure 78*. Un voltamètre à eau acidulée et à électrodes de platine peut être mis en circuit sur une batterie d'accumulateurs (position 1 de l'interrupteur) ou sur une résistance (position 2); le circuit comprend un ampèremètre



78. Polarisation d'un voltamètre.

dont le zéro est au milieu du cadran. Fermons l'interrupteur en position 1 : le générateur débite dans le voltamètre et l'électrolyse se produit, l'ampèremètre déviant vers la gauche. Plaçons maintenant l'interrupteur en position 2 : le générateur est hors circuit et cependant l'ampèremètre dévie vers la droite : il passe encore un courant. Le voltamètre joue alors le rôle de générateur; ses électrodes qui

étaient *identiques* au début de l'expérience sont devenues des pôles différents d'un générateur. On dit que le voltamètre s'est *polarisé*; d'après le sens du courant que débite un voltamètre polarisé, on conclut :

▶ *Lorsqu'un voltamètre se polarise, l'anode devient le pôle positif du générateur; autrement dit l'électrode positive du voltamètre reste le pôle positif du générateur.*

Poursuivons l'expérience : nous constatons que le courant de *dépolarisation* ne dure que quelques secondes.

Quelles sont les causes de la polarisation? Remplaçons l'eau acidulée par une solution identique mais n'ayant pas subi l'électrolyse : la polarisation du voltamètre subsiste. Elle ne dépend donc pas de l'électrolyte. Observons les électrodes de platine : nous constatons qu'après l'électrolyse, elles restent recouvertes de bulles gazeuses. Si nous frottons ces électrodes avant d'établir le contact 2, nous constatons que la polarisation a presque disparu. Si on insuffle de l'oxygène sur la cathode et de l'hydrogène sur l'anode la polarisation n'a pas lieu. C'est ce qui se produit lorsque le voltamètre polarisé débite du courant car l'ancienne anode est devenue cathode et inversement.

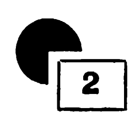
▶ *La polarisation d'un voltamètre est due à une dissymétrie qui se crée sur les électrodes au cours de l'électrolyse. Dans le cas d'un voltamètre à eau acidulée et électrodes de platine, la cathode absorbe de l'hydrogène, l'anode de l'oxygène.*

La dépolarisation peut se faire spontanément par simple diffusion des gaz retenus par les électrodes.

■ **101. Force électromotrice de polarisation.** — Lorsque le voltamètre est le siège d'une électrolyse, il possède une force contre-électromotrice e, dont la cause est la polarisation des électrodes. Il se comporte comme une pile en opposition sur le générateur. Quand l'électrolyse cesse, il conserve un certain temps cette dissymétrie des électrodes; il devient un générateur de force électromotrice $E = e$.

Lorsque la dissymétrie des électrodes qui se produit au cours de l'électrolyse est due à une attaque chimique, la polarisation du voltamètre subsiste longtemps : on a un *accumulateur*.

▶ *Un accumulateur est un voltamètre fortement polarisé.*



ACCUMULATEURS

■ **102. Principe.** — Il était intéressant de rechercher quels étaient les voltamètres capables de fournir un courant de dépolarisation pen-

dant un temps suffisant pour être pratiquement utilisable. En 1859, l'ingénieur français ***Gaston Planté*** (1834-1898) montra que si dans l'expérience de polarisation d'un voltamètre à eau acidulée on remplaçait les électrodes de platine par des électrodes en plomb, on obtenait une polarisation *durable* : le principe des accumulateurs au plomb était trouvé.

■ 103. Accumulateurs au plomb. — Les électrodes en plomb sont plongées dans de l'acide sulfurique à 20 %. Cet acide doit être pur. On augmente la polarisation en creusant les plaques d'alvéoles (*fig.* 79) dans lesquelles on place du minium Pb_3O_4 pour les électrodes positives et de l'oxyde PbO pour les électrodes négatives, créant ainsi une dissymétrie initiale.

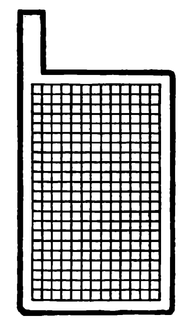
L'accumulateur doit être polarisé par le passage d'un courant dans l'électrolyte : ceci constitue ***la charge*** de l'accumulateur. Pendant la première charge ou *formation* de l'accumulateur, on peut admettre qu'il se produit les réactions suivantes :

1° *à l'anode*, plaque positive, où se produit l'oxygène,

$$Pb_3O_4 + O_2 \longrightarrow 3PbO_2, \text{ oxyde puce brun.}$$

2° *à la cathode*, plaque négative, où arrive l'hydrogène,

$$PbO + H_2 \longrightarrow Pb + H_2O.$$



79. Plaque d'accumulateur au plomb.

L'accumulateur est alors ***formé;*** on améliore la formation de l'accumulateur par des charges et décharges successives.

Si les pôles sont reliés à un circuit extérieur, l'accumulateur débite du courant : c'est la ***décharge***. Les dégagements gazeux sont alors inversés et on admet souvent les réactions suivantes, selon la théorie de la double sulfatation :

1° au pôle + (nouvelle cathode)

$$PbO_2 + H_2 + H_2SO_4 \longrightarrow PbSO_4 + 2H_2O$$

2° au pôle — (nouvelle anode)

$$Pb + SO_4^{--} \longrightarrow PbSO_4 + 2\,e^-.$$

Au cours d'une nouvelle charge, les réactions suivantes se produiraient :

1° au pôle + (anode) :

$$PbSO_4 + SO_4^{--} + 2\,H_2O \longrightarrow PbO_2 + 2\,H_2SO_4 + 2\,e^-.$$

2° au pôle — (cathode) :

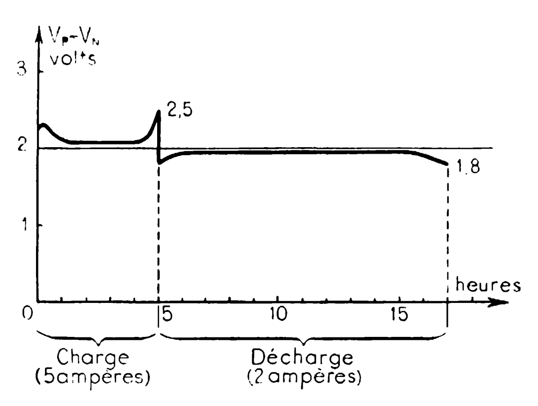
$$PbSO_4 + H_2 \longrightarrow H_2SO_4 + Pb$$

On retrouve ainsi au pôle positif PbO_2 et au pôle négatif le plomb.

¶ **Remarque :** Les réactions précédentes donnent certainement un aspect simpliste des phénomènes, car l'expérience montre que la concentration du liquide électrolytique varie au cours de la charge et de la décharge : on vérifie souvent la charge en mesurant le titre de la solution sulfurique au moyen d'un aéromètre Baumé.

■ **104. Caractéristiques de l'accumulateur au plomb.** — Pendant la charge, la f. c. é. m. de l'accumulateur reste voisine de 2 volts pour atteindre 2,5 volts à la fin de la charge (*fig. 80*).

Pendant la décharge, la f. é. m. de l'accumulateur diminue et se fixe à ***2 volts pendant presque toute la décharge.*** Vers la fin, elle décroît très rapidement et il ne faut pas laisser cette f. é. m. devenir inférieure à 1,8 volts.



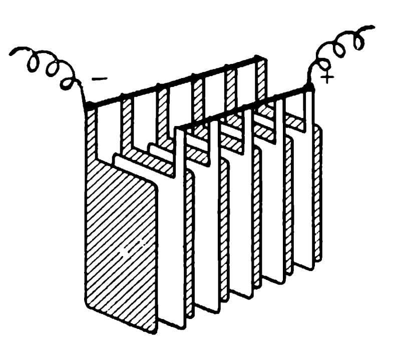
80. Variation de la différence de potentiel aux bornes d'un accumulateur pendant la charge et la décharge.

La *résistance intérieure* est très faible : 0,01 ohm; les colonnes d'électrolyte entre les plaques se trouvent montées en parallèle entre les bornes (*fig. 81*).

La ***capacité*** d'un accumulateur se mesure par la quantité d'électricité qu'il peut fournir à la décharge; on l'exprime en ***ampères-heure;*** elle est de l'ordre de 10 à 11 A.H par kilogramme de plaque.

On appelle ***rendement en quantité*** le rapport $\frac{Q'}{Q}$ de la quantité d'électricité Q' fournie par l'accumulateur au cours de la décharge à la quantité d'électricité Q qui lui a été cédée par le courant de charge. Il est de l'ordre de 0,9.

Le ***rendement en énergie*** est le rapport $\frac{W'}{W}$ de l'énergie W' fournie par l'accumulateur au cours de la décharge ($W' = EQ'$) à l'énergie W qu'il a reçue au cours de la charge : W est supérieur à W' à cause de l'effet Joule et aussi parce que $Q' < Q$. Ce rendement est de l'ordre de 0,7.



81. Disposition des plaques positives et négatives.

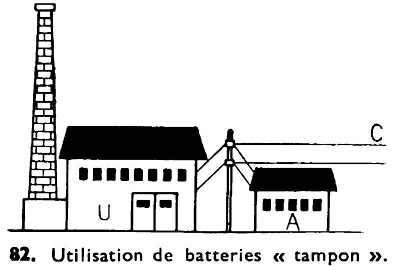
L'accumulateur au plomb est assez bon marché; son gros avantage est d'avoir une f. é. m. pratiquement constante. Mais il est lourd, et demande beaucoup d'entretien : il se sulfate (formation de $PbSO_4$ blanc sur les plaques) lorsqu'il n'est pas chargé régulièrement; il ne peut débiter que des courants qui en ampères s'expri-

ment par un nombre voisin de $\frac{1}{10}$ de sa capacité exprimée en ampères-heure. La décharge dure alors 10 heures.

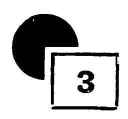
■ **105. Accumulateurs alcalins.** — L'électrolyte est une solution alcaline, solution de potasse KOH; les plaques positives sont constituées par de l'oxyde de nickel NiO, les plaques négatives par du fer recouvert d'oxyde ferreux. Pendant la charge il y a suroxydation de l'oxyde de nickel et réduction de l'oxyde ferreux; c'est l'inverse au cours de la décharge.

Au cours de la décharge la f. é. m. descend constamment de 1,7 volts à 1,25 V puis à 0,6 V : elle est faible et n'est pas constante. Le rendement en énergie est de l'ordre de 0,5. L'accumulateur alcalin est plus léger et moins fragile que l'accumulateur au plomb; son prix de revient est encore élevé.

■ **106. Usages.** — Les accumulateurs sont d'un usage courant dans les laboratoires, l'automobile, la radio. Certains véhicules électriques sont mus grâce au courant de décharge de ces accumulateurs. Certaines usines utilisent des batteries d'accumulateurs en dispositif de « secours-tampon ». L'usine U (*fig.* 82) doit débiter un courant d'intensité à peu près constante. Si la consommation en C est faible, les batteries A montées en dérivation se chargent; si la consommation est trop forte, les batteries se déchargent en donnant l'appoint de courant nécessaire. C'est ainsi que le courant continu d'éclairage est fourni au métropolitain.

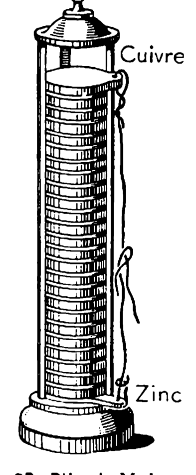


82. Utilisation de batteries « tampon ».



PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES

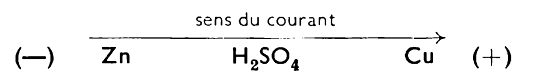
◇ **107. La pile de Volta.** — Le physicien italien *Galvani* professeur à Bologne (1737-1798) remarqua, vers 1790, qu'une grenouille écorchée et décapitée depuis un certain temps subissait des contractions musculaires quand s'interposait une lame métallique ou mieux encore deux métaux différents entre un muscle et un nerf. La légende raconte que cette grenouille était suspendue au balcon de fer de la maison du savant, et qu'un second contact métallique accidentel provoqua les contractions; ou encore que cette grenouille était destinée à la préparation d'un bouillon pour soigner un léger rhume contracté par une dame bolonaise. *Volta* (voir § 1) supposa que de l'électricité était produite par les deux métaux différents séparés par le muscle... : c'était une pile électrique.

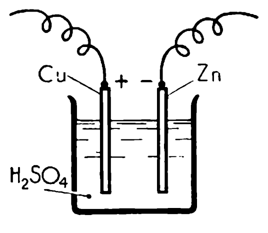


83. Pile de **Volta.**

Au début de 1800, il imagina d'empiler (d'où le nom de pile) des rondelles de zinc, de drap mouillé, de cuivre, et ainsi de suite, toujours dans le même ordre : la première pile était inventée (*fig.* 83). *Antoine-César Becquerel* montra en 1829 que l'électricité y était due à des effets chimiques.

On peut réaliser l'élément de pile Volta en plongeant dans de l'eau acidulée une lame de cuivre (+) et une lame de zinc (—); la f. é. m. est de 1 volt; mais dès que la pile débite du courant, ***elle se polarise*** et sa f. é. m. tombe à zéro (*fig.* 84). Lorsque la pile débite, le courant la traverse du zinc au cuivre, et il se produit une électrolyse :





84. Élément **Volta.**

Les ions SO_4^{--} et H^+ transportent les charges négatives du cuivre au zinc à l'intérieur de la pile, mais les seules réactions chimiques qui se produisent aux électrodes sont :

$$2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2$$

qui se dégage sur le cuivre

et $$Zn \longrightarrow Zn^{++} + 2e^-$$

au pôle négatif.

Les électrons ainsi libérés par le zinc donnent le courant dans le circuit extérieur.

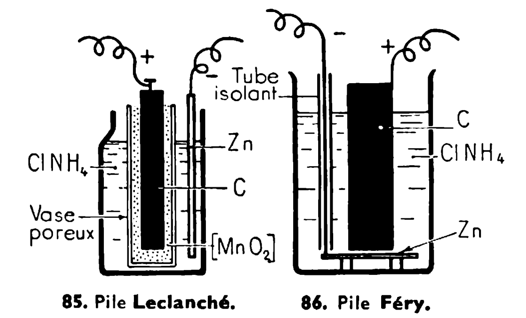
L'hydrogène forme sur le cuivre une couche isolante qui polarise la pile et diminue sa f. é. m.

¶ **Remarque :** Ne pas confondre la *polarisation d'une pile* avec la *polarisation d'un voltamètre.*

108. Piles à dépolarisant. — Pour avoir une pile pratique, il faudrait ajouter un corps réagissant sur l'hydrogène, c'est-à-dire un oxydant : on empêche ainsi la polarisation de se produire.

Le dépolarisant est une substance oxydante que l'on place au voisinage immédiat de l'électrode positive.

La première de ces piles pratiques fut imaginée en 1868 par Georges Leclanché (1839-1882). La ***pile Leclanché*** comporte



85. Pile **Leclanché.** **86.** Pile **Féry.**

une électrode de charbon des cornues, entourée de bioxyde de manganèse MnO_2 dépolarisant, contenu dans un vase poreux; l'électrolyte est une solution de sel ammoniac NH_4Cl, et l'autre électrode est une lame de zinc (*fig. 85*). La chaîne s'écrit :

$$(-) \quad \overrightarrow{\text{Zn} \qquad NH_4Cl \qquad \text{C}}^{\text{sens du courant}} \quad (+)$$

Au pôle négatif, on a :

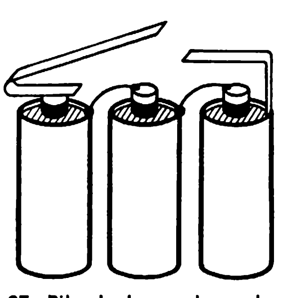
$$Zn \longrightarrow Zn^{++} + 2e^-.$$

Au pôle positif :

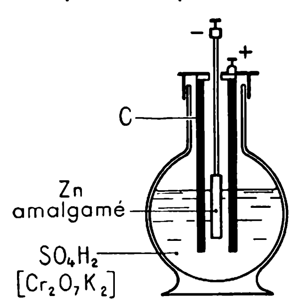
$$2NH_4^+ + 2e^- \longrightarrow 2NH_3 + H_2.$$

L'hydrogène est oxydé par le dépolarisant.

Il faut remettre du sel ammoniac de temps en temps. La f. é. m.



87. Pile de lampe de poche.

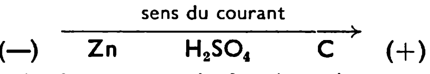


88. Pile Grenet.

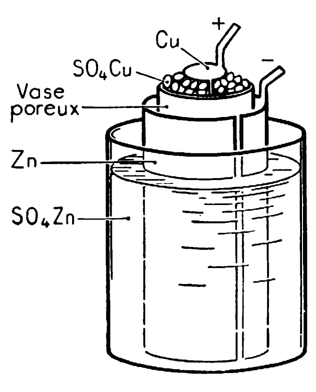
est de 1,5 volt. La dépolarisation est lente, et l'emploi de ces piles ne peut être qu'intermittent (sonneries).

¶ **Remarque :** La pile **Féry** est du même type, mais le dépolarisant n'est autre que l'oxygène de l'air traversant le charbon *poreux* (*fig. 86*); l'électrolyte peut être stabilisé dans une gelée : on obtient ainsi les piles pour lampes de poche (*fig. 87*).

Dans la ***pile Grenet*** l'électrode positive est en charbon des cornues, l'électode négative une lame de zinc amalgamé; l'électrolyte est une solution sulfurique additionnée de bichromate de potassium $K_2Cr_2O_7$ comme dépolarisant (fig. *88*). La chaîne s'écrit :



La f. é. m. est de 2 volts; c'est une pile excellente, à dépolarisation rapide, pouvant débiter un courant assez intense d'autant plus que sa résistance intérieure est faible (électrodes rapprochées).



89. Pile Daniell.

109. Piles impolarisables. — En 1836, ***Daniell*** avait imaginé une pile

incapable de se polariser. L'électrode positive est en cuivre, plongeant dans du sulfate de cuivre; l'électrode négative est en zinc, plongeant dans du sulfate de zinc; les deux solutions sont séparées par un vase poreux (*fig. 89*). La chaîne s'écrit :

sens du courant →

(—) Zn $ZnSO_4$ $CuSO_4$ Cu (+)

Au pôle négatif, nous avons toujours la réaction :

$$Zn \longrightarrow Zn^{++} + 2e^- .$$

Les électrons ainsi libérés vont vers le cuivre par le circuit extérieur et forment au pôle positif la réaction :

$$Cu^{++} + 2e^- \longrightarrow Cu$$

Les ions SO_4^{--} ne servent qu'à transporter les charges négatives du cuivre au zinc.

La concentration en sulfate de zinc augmente. L'ion Cu^{++} de $CuSO_4$ se dépose sur l'électrode positive. Il y a donc consommation de zinc et de sulfate de cuivre : on ajoute des cristaux de sulfate de cuivre autour du cuivre pour alimenter la consommation de ce sel. La f. é. m. est de 1,1 volt.

Nous avons signalé la ***pile étalon Weston*** (voir § *99*, *fig.* *77*), impolarisable, et dont la f. é. m. est de 1,0186 volt à 20°. La chaîne s'écrit :

sens du courant →

(—) Cd $CdSO_4$ Hg_2SO_4 Hg (+)

Son fonctionnement est exactement comparable à celle de la pile Daniell; la concentration en sulfate de cadmium ne peut pas augmenter puisque la solution, en présence de cristaux, est constamment saturée. La pile reste donc toujours identique à elle-même, surtout si on ne la fait pas débiter, ce qui est précisément réalisé dans la méthode d'opposition.

¶ **Remarque :** Tandis qu'un accumulateur peut débiter un courant de plusieurs ampères et possède une résistance intérieure très faible (négligeable), une pile ne peut pas fournir plus de 0,1 ampère, et sa résistance intérieure est en général de l'ordre de 1 ohm.

◀ RÉSUMÉ ▶

Lorsqu'un voltamètre fonctionne comme récepteur, il se ***polarise,*** *et devient capable de jouer le rôle d'un générateur; le courant de dépolarisation en sens inverse du premier est en général assez bref. La f.é.m. mise en jeu est égale à la f.c.é.m. du récepteur.*

Un ***accumulateur*** *n'est autre qu'un voltamètre susceptible de se polariser profondément et de fournir ensuite un courant de dépolarisation réellement utilisable. Le courant de* ***charge*** *modifie les électrodes, qui reviennent à leur état initial pendant la* ***décharge.*** *Les accumulateurs au plomb ont des électrodes en plomb plongeant dans une solution sulfurique à 20 %; il faut les former par des charges et des décharges successives; on peut les former artificiellement en garnissant les électrodes positives de minium* Pb_3O_4*, les électrodes négatives d'oxyde* PbO. *La f.é.m. est de*

2 volts et la résistance intérieure négligeable, par construction. La ***capacité*** *d'un accumulateur est la quantité d'électricité exprimée en* ***ampères-heure*** *que peut fournir l'appareil pendant sa décharge.*

Les accumulateurs alcalins ont des électrodes positives en oxyde de nickel, des électrodes négatives en fer ou cadmium, plongées dans une solution de potasse; la f.é.m. est de 1,3 volt.

La ***pile Volta*** *:* (— Zn; H_2SO_4; Cu +)

se polarise rapidement par suite du dégagement de l'hydrogène sur le pole + ; f. é. m. : 1 volt.

Les piles à ***dépolarisant*** *sont en particulier :*

la ***pile Leclanché*** : [— Zn; NH_4Cl; C +]; *dépolarisant* MnO_2; 1,5 *volt;*

la ***pile Grenet*** : [— Zn; H_2SO_4; C +]; *dépolarisant* $K_2Cr_2O_7$; 2 *volts.*

Les piles ***impolarisables*** *sont en particulier :*

la ***pile Daniell*** : (— Zn; $ZnSO_4$; $CuSO_4$; Cu +); 1,1 *volt;*

*l'****élément Weston*** : (— Cd; $CdSO_4$; Hg_2SO_4; Hg +); 1,0186 *volt à* 20°.

★ EXERCICES ★

105. — Deux piles Daniell (E = 1,1 volt; r = 2,5 ohms, chacune) montées en série, débitent dans une résistance extérieure de 5 ohms. Calculer la variation de masse de la lame de zinc et de la lame de cuivre après 1 heure de fonctionnement Zn = 65; Cu = 64. — **Rép.** : *0,267 g; 0,262 g.*

106. — Calculer la masse de minium transformé à la première charge d'un accumulateur au plomb (formation artificielle), sachant que la capacité est de 60 ampères-heure, le rendement égal à l'unité; Pb = 207; O = 16.

107. — Deux accumulateurs (E = 2 volts; r = 0, chacun) sont placés d'abord en série, puis en parallèle, chaque fois pour débiter dans une résistance extérieure de 8 ohms. Quelle sera dans chaque cas la durée de la décharge, chaque accumulateur ayant une capacité de 15 ampères-heure, et en supposant le courant constant?
Rép. : *30 heures; 120 heures.*

108. — Au bout de combien de temps faut-il renouveler le zinc, pesant 50 g, d'une pile Leclanché qui fonctionne au total $\frac{1}{2}$ heure par jour en débitant chaque fois un courant de 0,1 ampère? Zn = 65.

109. — Une pile au bichromate (E = 2 volts; r = 0,1 ohm) débite dans une résistance extérieure de 3,9 ohms. Quelle est la masse de dépolarisant consommé en 10 minutes, sachant que l'action oxydante du bichromate est conforme à la réaction :

$$K_2Cr_2O_7 + 4\,H_2SO_4 \longrightarrow Cr_2(SO_4)_3 + K_2SO_4 + 4\,H_2O + \frac{3}{2}O_2 \nearrow$$

Cr = 52; O = 16; K = 39.

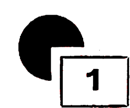
Rép. : *0,152 gramme.*

110. — Trois accumulateurs alcalins, de résistance intérieure négligeable, sont montés en série; ils débitent un courant de 1,5 ampère dans une résistance de 2,6 ohms. Calculer la force électromotrice de chaque générateur. Que devient l'intensité du courant si on retourne l'un d'eux?

II. MAGNÉTISME

CHAPITRE XIII

PROPRIÉTÉS DES AIMANTS



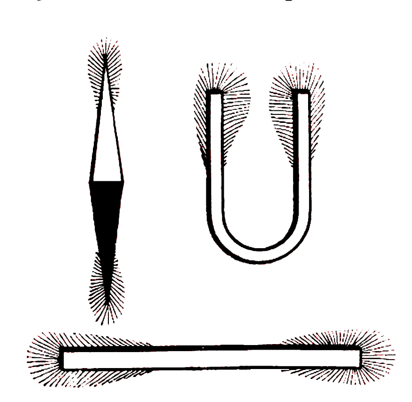
PROPRIÉTÉS DES PÔLES

■ **110. Aimants naturels, aimants artificiels.** — Certaines pierres, dites *pierres d'aimant* ou *aimants naturels*, ont la propriété d'attirer la limaille de fer et d'en maintenir des houppes sur certaines régions de leur surface (*fig. 90*). On a désigné sous le nom de ***magnétisme*** les





90. Pierre d'aimant.



91. Aimants artificiels.

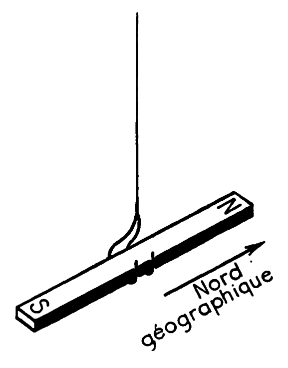
phénomènes qui se rattachent à cette propriété et l'oxyde de fer Fe_3O_4 qui constitue les aimants naturels est appelé *oxyde magnétique*.

On sait fabriquer des aimants d'acier de forme régulière (barreaux, aiguilles, fers à cheval) jouissant des mêmes propriétés (*fig. 91*).

En général la limaille se fixe aux extrémités de ces *aimants artificiels*. On appelle ***pôles*** ces régions d'attraction de la limaille de fer.

▶ ***Définition.*** *On appelle pôles d'un aimant les régions où s'attache la limaille de fer.*

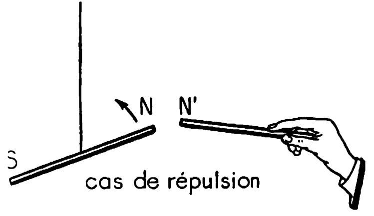
■ **111. Pôle nord, pôle sud.** — Suspendons un barreau aimanté droit à un fil fin, sans torsion, de façon que le barreau demeure horizontal. Nous constatons que le barreau s'oriente et qu'un de ses pôles, toujours le même, se dirige sensiblement vers le nord géographique (*fig.* 92). L'autre pôle se dirige alors vers le sud. Les deux pôles d'un aimant ont donc des propriétés différentes.



92. Orientation d'un aimant.

▶ ***Définition.*** *Le pôle nord d'un aimant est celui qui se dirige vers le nord géographique; l'autre pôle est le pôle sud.*

A la suite de cette expérience on marque généralement les lettres N et S sur les deux pôles du barreau aimanté.

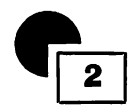


93. Action réciproque des pôles.

■ **112. Actions réciproques des pôles.** — Approchons du pôle nord N d'un aimant SN suspendu comme précédemment le pôle nord N′ d'un autre aimant (*fig.* 93) : le pôle N est repoussé.

On constate de même qu'un pôle sud repousse un pôle sud; au contraire un pôle nord attire un pôle sud et par conséquent un pôle sud attire un pôle nord (principe de l'action et de la réaction).

▶ ***Loi.*** *Les pôles de même nom se repoussent; les pôles de noms contraires s'attirent.*



HYPOTHÈSE DES MASSES MAGNÉTIQUES

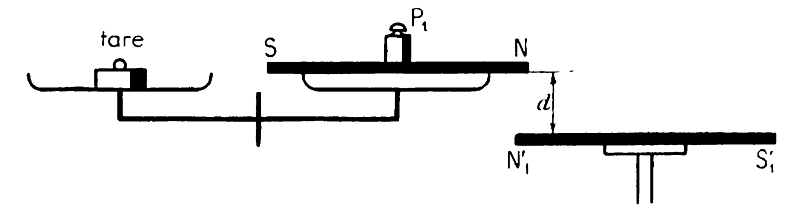
■ **113. Interprétation des phénomènes d'attraction et de répulsion entre aimants.** — Les forces qui s'exercent entre deux pôles d'aimants sont des forces d'attraction ou de répulsion *à distance*, tout comme la force de pesanteur (attraction à distance d'un corps par la Terre), tout comme les forces d'attraction universelle dues à

l'action de deux masses matérielles l'une sur l'autre, et dont la pesanteur n'est qu'un cas particulier.

Ces analogies ont conduit Coulomb à formuler en 1786 l'*hypothèse des masses magnétiques* :

▶ *Les forces d'attraction ou de répulsion entre pôles d'aimant sont dues à des quantités de magnétisme (masses magnétiques) nord ou sud.*

■ **114. La masse magnétique, grandeur mesurable.** — Plaçons un aimant SN (*fig. 94*) sur le plateau d'une balance et faisons la tare. Approchons du pôle nord N le pôle nord N'_1 d'un autre aimant; nous



94. Mesure des forces de répulsion.

constatons que la balance s'incline du côté de la tare. Rétablissons l'équilibre au moyen d'un poids P_1 : la valeur de ce poids dépend de la distance $NN'_1 = d$ à l'équilibre et P_1 décroît lorsque d augmente. Il en résulte que, si les aimants SN et $S'_1N'_1$ sont suffisamment longs, on peut négliger les actions des pôles sud S et S'_1 sur eux-mêmes et sur les pôles nord N et N'_1. C'est ce que nous supposerons dans la suite.

Recommençons l'expérience en substituant un aimant $S'_2N'_2$ à l'aimant $S'_1N'_1$; pour rétablir l'équilibre *à la même distance d*, il faut placer dans le plateau droit un poids P_2. Si $P_2 = P_1$, nous dirons que les masses magnétiques nord de N'_1 et de N'_2 sont égales.

▶ *Deux pôles d'aimants ont même masse magnétique s'ils exercent une même force sur un autre pôle d'aimant placé à la même distance.*

Lions ensemble les aimants $N'_1S'_1$ et $N'_2S'_2$ de façon que les pôles N'_1 et N'_2 soient juxtaposés. Pour rétablir l'équilibre de la balance lorsque N'_1 et N'_2 sont à la même distance d de N, il faut placer dans le plateau droit un poids $P = P_1 + P_2$. Cette force étant due à l'ensemble des masses magnétiques de N'_1 et N'_2, il est logique d'admettre que les masses magnétiques s'ajoutent et de poser que la force exercée par une masse magnétique M est proportionnelle à cette masse.

▶ ***Définition.*** *La masse magnétique d'un pôle d'aimant est proportionnelle à la force que ce pôle exerce à une distance fixe sur un autre pôle déterminé.*

Appliquons le principe de l'action et de la réaction : le pôle N exerce sur le pôle N'_1 la même force P_1; cette force P_1 doit donc être pro-

portionnelle à la masse magnétique m du pôle N aussi bien qu'à la masse magnétique m'_1 du pôle N'_1 et on peut écrire :

$$P_1 = k\,m \times m'_1.$$

■ **115. Masses magnétiques positives et négatives.** — Si dans l'expérience de *la figure 94*, nous substituons au pôle nord N'_1 le pôle sud S'_1, nous observons une attraction du pôle N, force croissante lorsque la distance d diminue et finalement N vient se coller sur S'_1 : il n'y a pas d'équilibre stable. Pour marquer le changement de sens de la force, nous conviendrons d'affecter du signe + les masses magnétiques nord et du signe — les masses magnétiques sud. Ceci revient à compter positivement les forces de répulsion et négativement les forces d'attraction :

$F > 0$ si m et m' sont de même signe, tous deux positifs ou tous deux négatifs.

$F < 0$ si m et m' sont de signes contraires (masse nord et masse sud).

L'expérience confirme cette interprétation; prenons deux aimants $S'_1N'_1$ et $S'_2N'_2$ correspondant aux forces P_1 et P_2 et supposons $P_1 > P_2$. Associons les deux pôles N'_1 et S'_2; la force de répulsion exercée par cet ensemble devient inférieure à P_1. La masse magnétique sud de S'_2 s'est retranchée de la masse magnétique nord de N'_1 : il y a eu *addition algébrique* des masses magnétiques.

▶ *Les masses magnétiques s'ajoutent algébriquement en comptant positivement les masses magnétiques nord et négativement les masses magnétiques sud.*

■ **116. La masse magnétique totale d'un aimant est nulle.** — Prenons deux aimants identiques N_1S_1, N_2S_2 et, après nous être assurés par l'expérience de la *figure 94*, que les pôles N_1 et N_2 d'une part, S_1 et S_2 d'autre part ont bien mêmes masses magnétiques, lions ensemble N_1S_2 et N_2S_1; nous constatons que cet ensemble n'a plus aucune action sur l'aimant NS attaché à la balance.

Soit m_1 la masse magnétique de N_1, m'_1 celle de S_1, m_2 et m'_2 celles de N_2 et S_2; nous pouvons affirmer que :

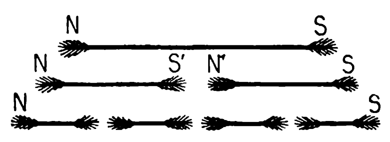
$$m_1 = m_2 \quad \text{et} \quad m_1 + m'_2 = 0 \quad \text{(pas d'action)}$$

donc $$m_2 + m'_2 = 0 \qquad m'_2 = -m_2.$$

▶ *Les masses magnétiques des pôles nord et sud d'un même aimant sont égales et de signes contraires.*

■ **117. Expérience de l'aimant brisé.** — Après avoir aimanté une fine aiguille d'acier NS (*fig. 95*), coupons-la en deux : *chaque moitié est un aimant complet*. N′ et S′ attirent la limaille de fer. Ces deux pôles ont des masses magnétiques égales et de signes contraires : en effet, celle de S′ est égale à celle de N (aimant complet), celle de N′ est égale à celle de S; elles sont donc égales entre elles, mais de signes contraires.

Brisons l'aimant NS′ : on obtient encore deux aimants et on peut répéter l'expérience autant de fois que l'on veut.

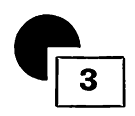


95. Expérience de l'aimant brisé.

Concluons :

▶ *L'expérience de l'aimant brisé montre qu'un aimant est constitué par l'association de petits aimants et qu'il est impossible d'isoler une masse magnétique sans qu'elle soit associée à une autre de signe contraire.*

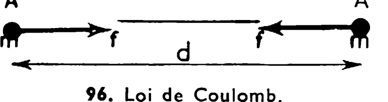
Ce dernier résultat oppose nettement les propriétés des masses magnétiques et les propriétés des charges électriques. On est ainsi conduit à mettre en doute l'existence même des masses magnétiques qui n'apparaissent plus que comme une pure hypothèse mathématique simplifiant cependant beaucoup l'interprétation des faits expérimentaux.



LOI DE COULOMB

■ **118. Influence de la distance. Loi de Coulomb dans le vide ou dans l'air.** — Faisons varier la distance d *à l'équilibre* entre les deux pôles N et N_1' : si la distance d est multipliée par 2, on constate que le poids P_1 rétablissant l'équilibre est divisé par 4; si d triple, P_1 est divisé par 9. Ainsi, lorsque la distance est *multipliée* par le facteur λ, la force est *divisée* par λ^2.

▶ **Loi de Coulomb.** *Dans le vide, ou pratiquement dans l'air, la force magnétique qui s'exerce entre deux pôles d'aimants varie en raison inverse du carré de leur distance.*



96. Loi de Coulomb.

La vérification directe de cette loi est très peu précise : nous admettrons qu'elle s'appliquerait à deux masses magnétiques ponctuelles (et hypothétiques) m et m' situées à la distance d l'une de l'autre (*fig. 96*).

Comme la force d'attraction F est déjà proportionnelle au produit $m.m'$ (§ *114*), on peut englober tous ces résultats par la relation :

$$F \quad K . \frac{m.m'}{d^2} .$$

C'est la *formule de Coulomb* (*1786*), uniquement valable dans le vide (ou pratiquement dans l'air). Le coefficient K dépend alors uniquement des unités choisies.

119. Unités M. K. S. A. — Il est commode de n'utiliser dans l'étude de l'électricité et de l'électromagnétisme qu'un seul système d'unités. Nous avons jusqu'ici utilisé un système d'unités dans lequel l'unité de travail était le joule, l'unité d'intensité l'ampère. Ce système est rattaché au newton et au mètre puisque le joule est l'unité de travail correspondante. On l'appelle le système M. K. S. A. :

M mètre
K kilogramme (unité de masse)
S seconde
A ampère.

Par suite de la définition de l'ampère (qui sera donnée au chapitre XVIII), le coefficient K est, dans ce système, égal à 10^{-7}. L'unité de masse magnétique n'a pas reçu de nom : nous l'appellerons l'unité M. K. S. A. de masse magnétique. Nous aurons donc :

$$F = 10^{-7}\frac{m.m'}{d^2}$$

relation où on exprime F en ***newtons;*** *d* en ***mètres;*** *m m'* en ***M. K. S. A.***

Rappelons que 1 kgf vaut 9,81 newtons.

● EXEMPLES. — 1. *Deux pôles nords identiques, distants de 2 cm, se repoussent avec une force de 1 gf. Calculer leurs masses magnétiques.*

Il suffit, dans la formule de Coulomb, de faire

$$m = m', \qquad f = \frac{9{,}81}{1\,000}\text{ newton}; \qquad d = 0{,}02\ m.$$

Le calcul algébrique donne :

$$f = 10^{-7}\frac{m^2}{d^2} \qquad m^2 = 10^7 f d^2$$

$$m = d\sqrt{10^7 f}.$$

$$m = 0{,}02\sqrt{10^7 \times \frac{9{,}81}{10^3}} = 2\sqrt{9{,}81}$$

$$m = 6{,}26 \text{ unités M. K. S. A.}$$

2. *On associe à l'un des pôles N_1 précédent un pôle sud S_2 de masse magnétique 2,26 M. K. S. A. Calculer la nouvelle force de répulsion à la même distance.*

L'ensemble N_1S_2 a comme masse magnétique :

$$m = 6{,}26 - 2{,}26 = 4 \text{ unités M. K. S. A.}$$

L'autre pôle nord n'ayant pas changé, sa masse magnétique est toujours $m' = 6{,}26$ unités M. K. S. A. On en déduit :

$$f' = 10^{-7}\frac{4 \times 6{,}26}{4.10^{-4}} = 6{,}26\ 10^{-3} \text{ newton}$$

ou $f' = 0{,}638\ gf.$

◀ RÉSUMÉ ▶

*Les **aimants** sont des corps qui attirent la limaille de fer. Le **magnétisme** est l'étude des propriétés des aimants*

*Dans un barreau aimanté l'attraction de la limaille se fait aux deux extrémités appelées **pôles.** L'un des pôles se dirige vers le nord lorsque l'aimant est mobile; c'est le pôle nord; l'autre pôle est le pôle sud.*

Deux pôles de même nom se repoussent et deux pôles de noms contraires s'attirent.

*On interprète ces actions au moyen de **l'hypothèse des masses magnétiques** : la masse magnétique d'un pôle est proportionnelle à la force que ce pôle exerce sur un autre pôle placé à une distance constante du premier. Les masses magnétiques s'ajoutent algébriquement en comptant positivement les masses magnétiques nord et négativement les masses magnétiques sud.*

Les masses magnétiques des pôles nord et sud d'un même aimant sont égales et de signes contraires.

***L'expérience de l'aimant brisé** montre qu'un aimant est constitué par l'association de petits aimants et qu'il est impossible d'isoler une masse magnétique sans qu'elle soit associée à une autre masse de signe contraire.*

***Coulomb** a énoncé en 1786 la loi suivante : la force d'attraction ou de répulsion magnétique s'exerçant entre deux pôles d'aimant varie en raison inverse du carré de leur distance.*

Dans le vide, ou pratiquement dans l'air, on a :

$$F = 10^{-7}\frac{m.m'}{d^2}$$

F en newtons; d en mètres; m et m′ sont alors exprimées en unités M.K.S.A.

★ EXERCICES ★

111. — Un aimant SN, de longueur 20 cm, porte en son pôle nord une masse magnétique $m = 1{,}5$ unité M. K. S. A. Calculer la force d'attraction qu'il exerce sur un aimant identique situé sur la droite SN, la distance du pôle nord du premier au pôle sud du second étant de 10 cm. — **Rép.** : *184 × 10^{-5} newton.*

112. — Deux aimants très longs sont attachés l'un à l'autre de façon à juxtaposer leurs pôles nord et leurs pôles sud. On approche les deux pôles nord ainsi confondus du pôle nord d'un troisième aimant; on mesure la force de répulsion, soit f_1. On attache ensuite les deux premiers aimants de façon à juxtaposer le pôle nord de l'un avec le pôle sud de l'autre; la force de répulsion exercée à la même distance du troisième pôle nord est alors divisée par 2. Calculer le rapport des masses magnétiques des pôles des deux premiers aimants.

113. — Deux aimants identiques de longueur 20 cm, dont les pôles nord portent une masse magnétique $m = 2$ unités M. K. S. A. sont disposés parallèlement de façon à former un rectangle de longueur 20 cm et de largeur 1 cm.

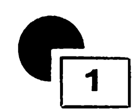
1° Calculer la force de répulsion d'un pôle sur le pôle de même nom.

2° Calculer et figurer la force d'attraction d'un pôle nord sur un pôle sud.

3° En déduire, avec une approximation suffisante, la force totale avec laquelle les deux aimants se repoussent. — **Rép.** : *4.10^{-3} newton; 0,9975.10^{-5} newton; 8.10^{-3} newton.*

CHAPITRE XIV

LE CHAMP MAGNÉTIQUE



DÉFINITION ET PROPRIÉTÉS

■ **120. Champ magnétique.** — Les forces exercées par un aimant décroissent rapidement lorsqu'on s'éloigne de cet aimant (Loi de Coulomb); un aimant n'a donc d'effet sensible que dans une zone restreinte; cette portion de l'espace s'appelle *le champ magnétique de l'aimant*. On a généralisé cette notion sans préciser la cause produisant les actions magnétiques.

▶ ***Définition.*** *On appelle* ***champ magnétique*** *toute région de l'espace où s'exercent des forces magnétiques, c'est-à-dire où une aiguille aimantée subit une action.*

Puisqu'un aimant s'oriente à la surface du globe terrestre, c'est qu'il existe un champ magnétique appelé champ magnétique terrestre. En dehors du champ terrestre et du champ des aimants, nous rencontrerons des champs magnétiques produits par le courant électrique.

■ **121. Vecteur Induction magnétique.** — Soit A (*fig. 97*) un point d'un champ magnétique. Plaçons en A un pôle ponctuel d'aimant de masse magnétique m; ce pôle sera soumis à une force $\vec{f}$ qui dépend évidemment du point A et de la masse magnétique *m*. Cette force est proportionnelle à *m* (conséquence de la définition de *m*) et nous poserons par définition : $\vec{f} = m.\vec{B}$.

$\vec{f} = m\vec{B}$; $\vec{B}$; A ; (+ m) ; (− m)

97.

Le **vecteur** $\vec{\mathbf{B}}$ ainsi introduit caractérise l'effet du champ magnétique sur un pôle d'aimant. On l'appelle le ***vecteur induction magnétique au point A.***

On voit que si $m = +1$, $\vec{f}$ est identique à $\vec{B}$ d'où la définition suivante :

▶ ***Définition*** *: La ligne d'action, le sens et l'intensité du vecteur induction magnétique en un point A sont représentés par la ligne d'action, le sens et l'intensité de la force qui s'exerce sur la masse magnétique nord unité placée en ce point.*

On remarquera que, pour une masse magnétique sud, nous avons fait la convention $m < 0$: la force qui s'exerce sur un pôle sud est dirigée *en sens inverse* du vecteur induction. Résumons :

$\vec{f}$ et $\vec{B}$ sont de même sens si $m > 0$: masse magnétique nord.

$\vec{f}$ et $\vec{B}$ sont de sens contraires si $m < 0$: masse magnétique sud.

¶ **Remarque :** Ne dites pas : l'induction magnétique est la force qui... Une induction n'est pas une force, pas plus qu'une vitesse n'est une longueur.

■ 122. Unité d'induction magnétique.

— Si, dans la formule précédente, on fait $m = 1$, $f = 1$, on aura $B = 1$, d'où la définition suivante :

▶ ***Définition*** *: L'unité* M. K. S. A. *d'induction magnétique est l'induction qui exerce sur l'unité* M.K.S.A. *de masse magnétique une force égale à 1 newton. On l'appelle le* ***tesla*** (T) *ou Weber par mètre carré* (Wb/m²).

Cette dénomination sera justifiée à propos de l'induction magnétique des courants.

On utilise encore une autre unité courante appelée ***gauss*** : *un tesla vaut* 10^4 *gauss* (ou myriagauss).

Ordres de grandeur : l'induction magnétique terrestre a comme composante horizontale (projection sur le plan horizontal) environ 0,2 gauss ou 2.10^{-5} tesla. Les aimants permanents créent dans leur voisinage des inductions de l'ordre de 100 gauss à 3 000 gauss (0,01 à 0,3 tesla). Avec des électro-aimants, on a pu atteindre 5 tesla et même (Kapitza en 1927) 30 tesla. Ces ordres de grandeur montrent que le tesla est une unité plus adaptée aux inductions obtenues avec des électro-aimants qu'aux inductions créées par des aimants.

En définitive la formule $\vec{f} = m\vec{B}$ sera toujours employée avec les unités suivantes :

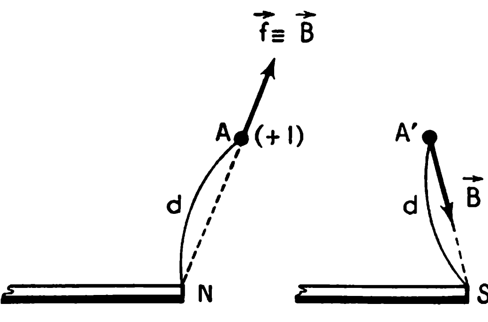
$\vec{f}$	=	m	×	$\vec{B}$
newton		unité M. K. S. A.		tesla

■ 123. Détermination de l'induction magnétique produite par un pôle d'aimant.

— Pour déterminer le vecteur induction magnétique en un point A, nous utilisons la définition donnée précédemment :

nous imaginons l'existence en A d'une masse magnétique nord $+1$ et nous cherchons la force à laquelle elle serait soumise.

Soit par exemple N le pôle nord d'un aimant très long (de façon que l'action du pôle sud très éloigné soit négligeable) (*fig. 98*). Cherchons l'induction créée par ce pôle en un point A distant de *d* de N. Plaçons en A la masse magnétique $+1$: d'après la *loi de Coulomb*, elle est soumise à une force $\vec{f}$ dont la ligne d'action est NA, de sens NA et d'intensité : $f = 10^{-7}\frac{m}{d^2}$.



98. Induction magnétique créée par un pôle nord et par un pôle sud.

L'induction $\vec{B}$ en A est un vecteur identique à $\vec{f}$: en particulier son intensité est :

$$\boxed{B = 10^{-7}\frac{m}{d^2}.}$$

Si l'induction était créée par un pôle sud S, elle serait dirigée vers ce pôle ($m < 0$) : c'est ce qui se produit en A′ (*fig. 98*).

■ 124. Composition des inductions magnétiques.

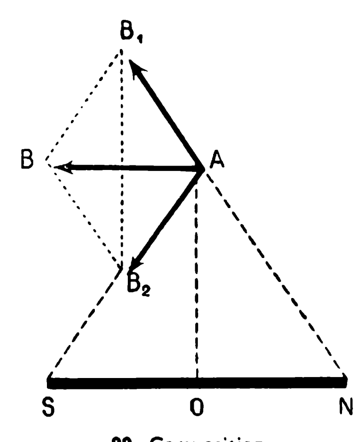
— L'induction magnétique en un point peut être produite par plusieurs pôles d'aimants ou plusieurs courants. La force $\vec{f}$ subie par la masse magnétique $+1$ placée en ce point est alors la résultante, obtenue par la règle de composition des forces concourantes, des forces dues à chaque système producteur du champ. $\vec{B}$ et $\vec{f}$ étant identiques, on peut énoncer la proposition suivante :

▶ ***L'induction magnétique en un point s'obtient en composant, selon la règle de composition des forces concourantes, les inductions magnétiques créées en ce point par les différents pôles ou courants.***

● **EXEMPLE.** — *Un barreau aimanté a 24 cm de long; son pôle nord a une masse magnétique $m = +5$ unités M. K. S. A. Calculer l'induction créée par ce barreau en un point A situé sur la médiatrice de SN, à 16 cm du barreau.*

L'induction $\vec{B}$ cherchée (*fig. 99*) est la résultante des deux inductions $\vec{B}_1$ et $\vec{B}_2$ créées respectivement par les pôles N et S. A étant équidistant de S et de N, $\vec{B}_1$ et $\vec{B}_2$ ont même intensité :

$$B_1 = B_2 = 10^{-7}\frac{m}{d^2} = 10^{-7}\frac{5}{\overline{AN}^2}.$$



99. Composition des inductions magnétiques.

Or $AN^2 = AO^2 + ON^2$
$= (0,16)^2 + (0,12)^2 = 0,04.$

$$B_1 = B_2 = 10^{-7} \times \frac{5}{0,04} = 1,25 \times 10^{-5} \text{ tesla.}$$

Le parallélogramme de composition des inductions est un losange dont $\vec{B}$ est la diagonale AB. La similitude des triangles ABB_1 et NSA permet d'écrire :

$$\frac{AB}{NS} = \frac{AB_1}{NA}$$

d'où :

$$B = B_1 \frac{NS}{NA} = 1,25 \times 10^{-5} \times \frac{0,24}{0,20}$$

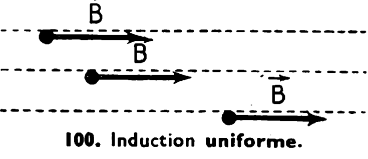
$$B = 1,5 \times 10^{-5} \text{ tesla}$$

ou 0,15 gauss.

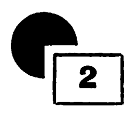
■ 125. Champ d'induction uniforme.

— On appelle ainsi *un champ magnétique tel que, en chacun de ses points, le vecteur induction magnétique ait même direction et même intensité.*

Les vecteurs $\vec{B}$ sont équipollents en tous les points. (*fig. 100*). On démontre d'ailleurs que si une induction magnétique a même direction en chaque point, elle a aussi même intensité, et réciproquement; le champ correspondant est uniforme.



100. Induction uniforme.



MOMENT MAGNÉTIQUE D'UN AIMANT

■ 126. Action d'un champ d'induction uniforme sur un aimant.

— Soit un aimant SN placé dans un champ d'induction uniforme $\vec{B}$ (*fig. 101*) faisant avec la droite SN un angle α.

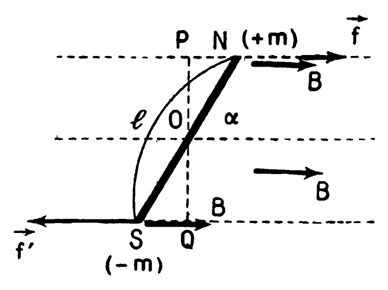
La masse magnétique $+ m$ placée en N est soumise à une force $\vec{f} = m\vec{B}$, du sens de $\vec{B}$; la masse magnétique $- m$ placée en S est soumise à la force $\vec{f'} = - m\vec{B}$, égale à f mais de sens contraire. Ces deux forces forment un *couple* caractérisé par son moment C égal au produit de l'une des forces par leur distance.

$$C = f \times PQ \qquad \text{Or : } PQ = SN \cdot \sin \alpha.$$

Posons SN = l, distance des pôles de l'aimant :

$$C = f.l. \sin \alpha = m\,B.l. \sin \alpha.$$

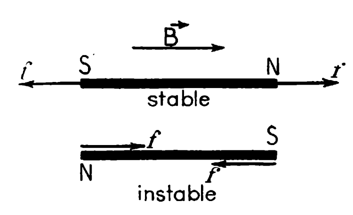
▶ *Un barreau aimanté, placé dans un champ d'induction uniforme, est uniquement soumis à un couple dont le moment est proportionnel à l'induction magnétique et varie avec la direction du barreau dans le champ.*



101. Couple exercé sur un aimant par une induction uniforme.

Ce moment est maximum pour $\sin \alpha = 1$, c'est-à-dire lorsque l'aimant est perpendiculaire à l'induction magnétique.

Il est nul, et par conséquent l'*aimant est en équilibre*, lorsque $\sin \alpha = 0$, soit pour $\alpha = 0$ ou $\alpha = 180°$ (*fig. 102*). Supposons $\alpha = 0$ et écartons l'aimant de cette position : le couple C n'est plus nul, mais il tend à ramener l'aimant dans sa position d'équilibre; on dit que l'*équilibre est stable*. Supposons $\alpha = 180°$, $C = 0$; mais en écartant l'aimant, le couple éloigne celui-ci de sa position d'équilibre : l'*équilibre est instable*.



102. Équilibre d'un aimant dans un champ d'induction uniforme.

On voit que lorsque l'équilibre est stable, la direction SN est celle de l'induction uniforme qui agit sur l'aimant. C'est cette direction qu'une aiguille aimantée parfaitement mobile prend spontanément dans une région où le champ d'induction peut être considéré comme uniforme.

● EXEMPLE. — *Un aimant a 16 cm de longueur; sa masse magnétique nord est égale à 5 unités M. K. S. A. Calculer le moment du couple auquel il est soumis lorsqu'il est placé dans un champ d'induction uniforme de 80 gauss qui fait un angle de 30° avec la direction SN.*

Nous utiliserons les unités du système M. K. S. A. :

$$m = 5; \quad l = 0{,}16\ m; \quad B = 8 \times 10^{-3}\ \text{tesla}$$

Comme $C = m.B.l \sin \alpha$ on obtient :

$$C = 5 \times 0{,}16 \times 8 \times 10^{-3} \times \frac{1}{2} = 32 \times 10^{-4}$$

$$C = 32 \times 10^{-4}\ \text{m} \times \text{newton}.$$

■ 127. Moment magnétique d'un barreau aimanté.

— Dans l'expression du moment du couple auquel est soumis un barreau aimanté placé dans un champ d'induction uniforme, $C = m.l.B. \sin \alpha$, on voit que l'aimant n'intervient que par le produit : $m.l$ où m est la masse magnétique d'un pôle et l la distance des pôles. Ainsi deux aimants de longueurs très différentes peuvent être, dans le même champ, soumis au même couple pourvu que ce produit reste le même.

C'est une grandeur caractéristique de l'aimant, que l'on appelle son ***moment magnétique*** : $\mathcal{M} = m.l$.

▶ ***Définition*** : *On appelle* ***moment magnétique*** *d'un aimant le produit* $\mathcal{M} = m.\ l$.

L'unité de moment magnétique n'a pas reçu de nom : nous dirons l'unité M. K. S. A. de moment magnétique. $\mathcal{M}$ sera exprimé dans cette unité si m est exprimé en unités M. K. S. A. et l en mètres.

● EXEMPLE. — *Calculer le moment magnétique de l'aimant étudié dans le paragraphe précédent.*

Rappelons que : $m = 5$; $l = 0{,}16$ m.

Donc $\mathcal{M} = 5 \times 0{,}16$. $\mathcal{M} = 0{,}8$ unités M. K. S. A.

L'expression du moment du couple subi par l'aimant devient alors :

C	$= \mathcal{M}.$	$B.$	$\sin \alpha$
m × newton	MKSA	tesla	

● EXEMPLE. — *Calculer le moment du couple exercé sur un aimant de moment magnétique $\mathcal{M} = 20$ M. K. S. A. par un champ d'induction uniforme de 0,2 gauss lorsque les directions de l'induction et de l'aimant forment un angle de 60°.*

Il suffit d'appliquer la relation précédente avec :

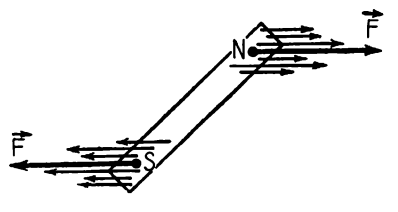
$$\mathcal{M} = 20; \quad B = 2 \times 10^{-5} \text{ tesla}; \qquad \sin \alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$C = 20 \times 2 \times 10^{-5} \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 2\sqrt{3} \times 10^{-4}.$$

$$C = 3{,}46 \times 10^{-4} \text{ m} \times \text{newton}.$$

Remarquons l'importance de la grandeur $\mathcal{M}$: la détermination précise de la masse magnétique est impossible; nous ne connaissons pas bien la distance des deux pôles. Par contre on sait mesurer les moments des couples C avec une grande précision, en utilisant le phénomène de torsion; la mesure de B peut également être faite avec une très bonne approximation; il en résulte que l'on peut déterminer le moment magnétique d'un aimant d'une façon très précise.

Mais il y a plus : d'après l'expérience de l'aimant brisé chaque portion de milieu aimanté est elle-même un petit aimant qui sera toujours caractérisée par la valeur de son moment magnétique.



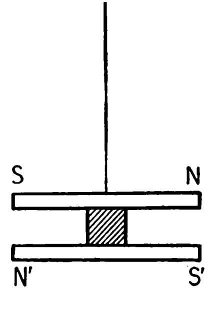
103. Les pôles nord et sud sont les centres des forces parallèles.

◇ **128. Définition précise des pôles d'un aimant.** — La limaille de fer ne se fixe pas en un point de l'aimant, mais sur toute une région voisine de l'extrémité nord ou sud. Il y a donc au voisinage du pôle nord en chaque point une masse magnétique nord; chacune de ces masses est soumise, lorsque l'aimant est placé dans un champ uniforme, à une force. Toutes ces forces (*fig. 103*)

sont parallèles et de même sens; elles admettent une résultante $\vec{F}$ appliquée en un point N, centre des forces parallèles, dont la position est indépendante de la direction du champ. C'est ce point N qui est le pôle nord de l'aimant. On définirait de même le pôle sud S. La longueur l de l'aimant qui intervient dans son moment magnétique $\mathcal{M} = m.l$ est la distance SN; elle diffère de la longueur du barreau aimanté.

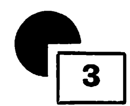
La droite SN s'appelle *l'axe magnétique* de l'aimant. On porte sur cette droite orientée de S vers N un vecteur de module M; c'est le *vecteur moment magnétique*.

L'intérêt de cette notion vient de ce que si plusieurs aimants sont rigidement liés entre eux, l'ensemble équivaut à un aimant unique dont le moment est la somme géométrique des vecteurs moments de chaque aimant.



104. Système **astatique.**

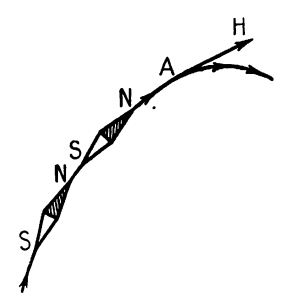
◇ **129. Système astatique.** — Soient deux aimants SN, S'N', *identiques* placés comme l'indique la *figure 104* et solidaires l'un de l'autre grâce à une tige de mica ou d'aluminium; ce système, placé dans un champ uniforme n'est soumis à aucun couple, les couples exercés sur chaque aimant se détruisant. Il est en équilibre indifférent; un tel système est appelé un système astatique.



SPECTRES MAGNÉTIQUES

■ **130. Lignes de force.** — Pour connaître la direction de l'induction magnétique en un point, on peut placer en ce point une très courte aiguille aimantée : si elle est suffisamment courte l'induction sera sensiblement la même en ses deux pôles et l'aiguille s'orientera de façon que sa ligne des pôles SN indique la direction de cette induction (§ 126). En déplaçant légèrement l'aiguille dans cette direction, on peut ainsi obtenir et tracer une ligne courbe tangente en chacun de ses points à la direction de l'induction magnétique en ce point (*fig. 105*) : une telle ligne est appelée une ligne de force.

▶ ***Définition :*** *Une ligne de force est une courbe qui est tangente au vecteur induction magnétique en chacun de ses points; on l'oriente dans le sens de l'induction.*



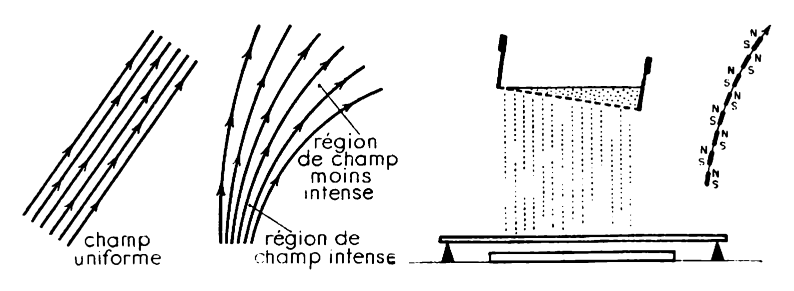
105. Une **ligne de force** est tangente à la direction du champ en chacun de ses points.

¶ **Remarque :** Il ne peut évidemment passer qu'une ligne de force en un point donné; sinon il y aurait deux vecteurs induction différents en ce point ce qui est absurde.

■ **131. Spectres magnétiques.** — La connaissance des lignes de force d'un champ magnétique permet de se faire une idée d'ensemble sur l'orientation de l'induction magnétique.

▶ **Définition.** *On appelle spectre magnétique un ensemble de lignes de force d'un champ d'induction magnétique.*

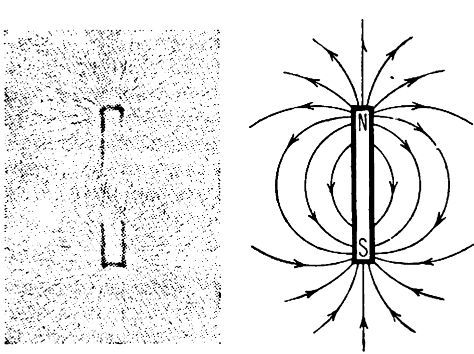
Il est clair que le spectre magnétique d'un champ d'induction uniforme est constitué par des lignes de force parallèles (*fig. 106*). Dans le cas d'un spectre quelconque, on montre que l'induction est d'autant plus intense que les lignes de force sont plus resserrées.



106. Lignes de force d'un **champ uniforme** (à gauche) et d'un champ quelconque.

107. Obtention d'un **spectre magnétique.**

■ **132. Spectres de limaille.** — Plaçons sur un barreau aimanté une feuille de carton; semons sur ce carton (*fig. 107*) grâce à un tamis très fin un peu de limaille de fer. Tapons très légèrement la feuille de carton avec le doigt : les grains de limaille se rangent en files régulières qui convergent vers les pôles : on obtient le spectre de limaille de l'aimant dans le plan de la feuille de carton.

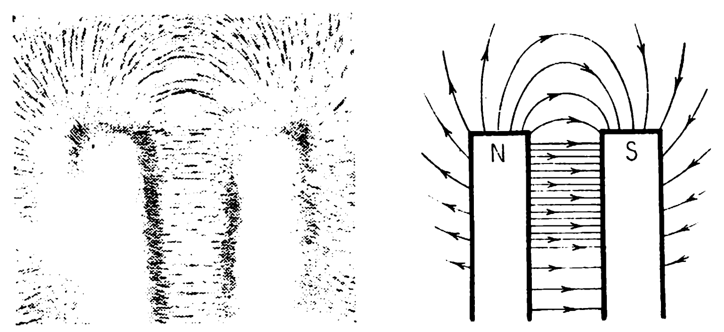


108. Spectre magnétique d'un barreau aimanté droit.

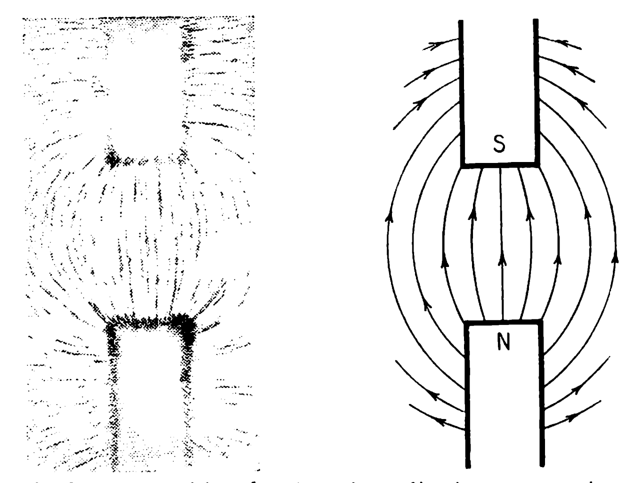
Chaque grain de limaille est devenu, au voisinage de l'aimant, un petit aimant qui, ainsi que l'aiguille aimantée de la *figure 105*, s'est orienté dans la direction du champ magnétique en son point de chute.

La *figure 108* représente le spectre d'un barreau aimanté droit; le schéma de droite précise la direction de quelques lignes de force.

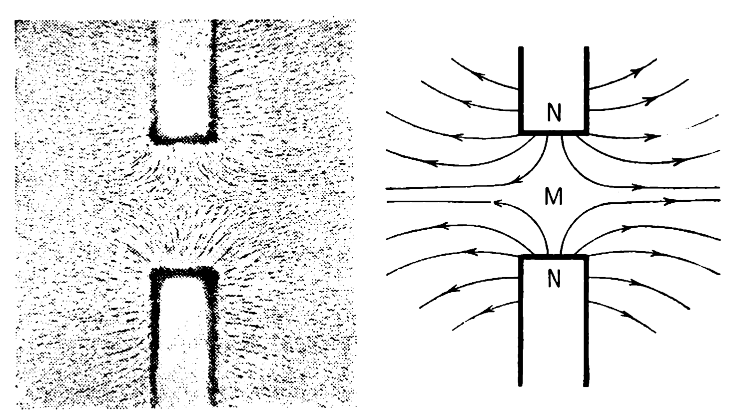
Avec un *aimant en fer à cheval* (*fig. 109*), on constate que le champ est uniforme dans une région assez étendue entre les pôles.



109. Spectre magnétique d'un **aimant en fer à cheval** : l'induction est **uniforme** entre les pôles.



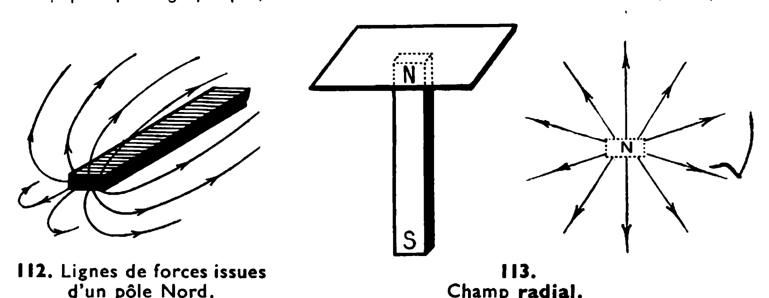
110. Spectre magnétique formé par **deux pôles de noms contraires.**



111. Spectre en **as de carreau** de deux pôles de même nom.

Les *figures 110* et *111* montrent des spectres dus à deux pôles de noms contraires ou de même nom : remarquer un spectre en « as de carreau » dans ce dernier cas, le champ est nul au point M.

Remarques : 1. A la lumière rouge, on peut réaliser les spectres de limaille sur un papier photographique; on éclaire un instant en lumière blanche, ce qui



112. Lignes de forces issues d'un pôle Nord.

113. Champ **radial.**

impressionne le papier. Après développement les lignes de forces s'observent en blanc sur fond noir.

2. En toute rigueur le grain de limaille s'oriente suivant la projection du champ magnétique sur le plan de la feuille de carton.

3. Il ne faut pas oublier que le champ existe dans tout l'espace autour de l'aimant (*fig. 112*). En particulier si le barreau droit est vertical et si l'on place le carton horizontalement sur un de ses pôles, on obtient dans ce plan un champ d'induction *radial* (*fig. 113*) : les lignes de force sont des droites issues du pôle.

◀ RÉSUMÉ ▶

On appelle ***champ magnétique*** *toute région de l'espace où s'exercent des forces magnétiques.*

En chaque point d'un champ magnétique, il existe un ***vecteur induction magnétique*** *dont la ligne d'action, le sens et l'intensité sont les mêmes que ceux de la force exercée sur la masse magnétique unité placée en ce point.*

Les unités d'induction magnétique sont le ***tesla*** *ou* ***weber par mètre carré*** *(en unités M. K. S. A.) et le* ***gauss*** *qui vaut* 10^{-4} *tesla.*

La force exercée sur la masse magnétique m en un point A où l'induction est B a pour expression :

$$\vec{f} = m\,\vec{B}$$

L'induction magnétique produite par un pôle ponctuel de masse m à une distance d de ce pôle a comme intensité :

$$B = 10^{-7}\frac{m}{d^2}$$ *en unités M. K. S. A.*

Les inductions magnétiques produites en un point par des aimants ou des courants se composent suivant la règle de composition des forces concourantes.

Un champ d'induction ***uniforme*** *a même direction, même intensité en chaque point.*

Il exerce sur un barreau aimanté un couple dont le moment a pour expression :

$$C = m.l.B \sin\alpha$$

α étant l'angle de l'induction avec le barreau.

*Le produit $m.l = \mathcal{M}$ s'appelle le **moment magnétique** du barreau; c'est une grandeur caractéristique du barreau et directement accessible à l'expérience. Le moment du couple subi par le barreau devient alors :*

$$\boxed{C = \mathcal{M} B \sin\alpha}$$

*Une **ligne de force** est une courbe qui est tangente au vecteur induction magnétique en chacun de ses points. Un **spectre magnétique** est un ensemble de lignes de forces; on peut le matérialiser par un spectre de limaille.*

★ EXERCICES ★

114. — Deux très longs aimants sont disposés dans le prolongement l'un de l'autre, les pôles nord en regard étant distants de 80 cm. Les masses magnétiques des pôles étant respectivement 4 et 10 unités M. K. S. A., calculer l'induction magnétique au point O situé à égale distance des deux pôles. En quel point situé entre les deux pôles le champ est-il nul? — **Rép.** : *0,037 gauss; 49 cm du pôle de masse magnétique 10.*

115. — Un aimant de 20 cm de longueur a un moment magnétique $\mathcal{M} = 0{,}4$ M. K. S. A. Calculer le champ produit sur l'axe de cet aimant à 10 cm du pôle nord.
Rép. : *178.10^{-7} tesla.*

116. — Deux aimants identiques au précédent sont placés sur un même axe, le pôle nord de l'un étant à 2 cm du pôle sud de l'autre; calculer la force avec laquelle ils s'attirent. Pourrait-on négliger l'action mutuelle des pôles éloignés?

117. — Un aimant de ~~moment~~ magnétique ~~0,8~~ M. K. S. A. ~~a 20 cm de longueur~~. Construire la direction du champ et calculer son intensité :
1° en un point situé à 12 cm du pôle nord et à 16 cm du pôle sud;
2° en un point situé à 12 cm du pôle sud et à 16 cm du pôle nord;
3° en un point équidistant des deux pôles, à 10 cm de l'aimant.
Rép. : *32.10^{-6} tesla; 32.10^{-6} tesla; 282.10^{-7} tesla.*

118. — Un barreau de moment magnétique $\mathcal{M} = 5$ unités M. K. S. A. est placé perpendiculairement à un champ d'induction uniforme B = 20 gauss. Calculer le moment du couple auquel il est soumis.

119. — Reprendre le même exercice en supposant que la direction SN fait un angle de 150° avec l'induction magnétique. — **Rép.** : *$C = 5 \cdot 10^{-3}$ m × newton.*

120. — On mesure les couples agissant sur un barreau aimanté soumis à un champ d'induction uniforme $B = 10^{-3}$ *tesla* pour les différentes orientations possibles du barreau. La valeur maximum ainsi trouvée est C = 4 m × newton. En déduire le moment magnétique du barreau.

121. — Deux barreaux aimantés sont soumis à deux couples égaux dans un même champ lorsque l'un d'eux $\mathcal{M}_1$ est perpendiculaire à l'induction, alors que l'autre $\mathcal{M}_2$ fait un angle de 45° avec cette induction. Calculer le rapport de leurs moments magnétiques. — **Rép.** : $\frac{\mathcal{M}_1}{\mathcal{M}_2} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0{,}707.$

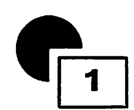
122. — Un aimant de mobile autour d'un axe vertical est soumis à deux inductions horizontales $B_1 = B_2 = 3.10^{-3}$ *tesla* perpendiculaires entre elles. Trouver la position d'équilibre de l'aimant, définie par l'angle α qu'elle fait avec B.

123. — Les deux barreaux précédents étant liés rigidement de façon que les directions S_1N_1 et S_2N_2 soient rectangulaires, calculer le moment du couple exercé sur l'ensemble par un champ d'induction uniforme B parallèle à S_1N_1. Montrer que ce couple a même valeur que celui que B exercerait sur un barreau dont le moment magnétique serait obtenu en prenant la résultante de deux vecteurs $\vec{\mathcal{M}}_1$ et $\vec{\mathcal{M}}_2$. Généraliser le résultat.

CHAPITRE XV

CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE

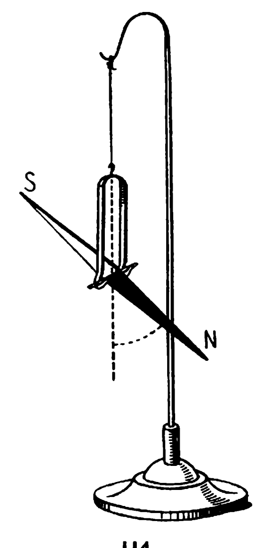
1. Déclinaison. Inclinaison.
2. Applications. Variations.



DÉCLINAISON — INCLINAISON

■ 133. Existence et direction du champ magnétique terrestre. — Nous avons distingué les pôles d'un barreau aimanté en remarquant que l'un d'eux, que nous avons appelé le pôle nord, se dirigeait toujours sensiblement vers le nord géographique. Cette action subie par une aiguille aimantée décèle donc l'existence d'un champ magnétique à la surface de la terre : c'est le ***champ magnétique terrestre.***

En chaque point du champ magnétique terrestre il existe une induction $\vec{B}$.



114.

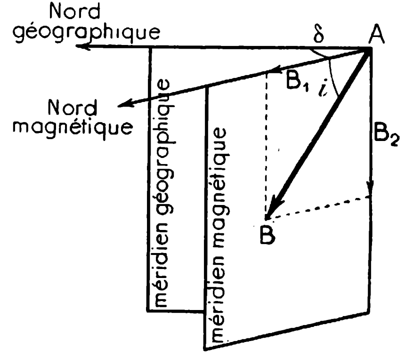
Pour trouver sa direction exacte en un lieu, prenons une aiguille aimantée en forme de losange allongé; par son centre de gravité faisons passer un axe horizontal supporté par un étrier (*fig. 114*) lui-même suspendu à un fil de cocon (sans torsion). Cette aiguille se trouve ainsi parfaitement mobile en tous sens, l'étrier tournant librement autour d'un axe vertical et l'aiguille tournant autour d'un axe horizontal. De plus la pesanteur n'a aucune action puisque le centre de gravité est sur l'axe horizontal.

Nous constatons que la direction SN n'est pas horizontale : le pôle nord pointe vers la terre, dans l'hémisphère nord. Le plan vertical contenant cette direction ne coïncide pas avec le méridien géographique (plan vertical passant par le nord géographique). Cette direction SN nous donne la direction de l'induction magnétique terrestre.

■ 134. Déclinaison. — Représentons en un point A de la surface du globe (*fig. 115*) le méridien géographique, plan vertical passant par le nord géographique, puis un plan vertical contenant l'induction magné-

tique terrestre $\vec{B}$, ou *méridien magnétique*. L'angle de ces deux plans est la ***déclinaison magnétique au lieu considéré***, soit δ. Elle est *occidentale* ou *négative* si le méridien magnétique est à l'ouest du méridien géographique; il en est ainsi à Paris actuellement (cas de figure). Elle est *orientale* ou *positive* si le méridien magnétique est à l'est du méridien géographique : ceci se produit à Honolulu par exemple.

■ **135. Inclinaison. Composantes du champ terrestre.** — Dans le plan du méridien magnétique, l'induction magnétique terrestre fait avec l'horizontale un angle i : c'est l'***inclinaison***. Cette inclinaison est positive si le pôle nord pointe vers la terre : c'est le cas dans l'hémisphère nord; elle est négative si le pôle sud pointe vers la terre, ce qui se produit dans l'hémisphère sud.



115. Déclinaison et inclinaison magnétiques.

On peut décomposer le vecteur champ magnétique terrestre $\vec{B}$ (*fig. 115*) en deux composantes l'une horizontale $\vec{B}_1$, l'autre verticale $\vec{B}_2$. La *composante horizontale* $\vec{B}_1$ est très importante en pratique car c'est la seule qui agit sur un barreau aimanté mobile seulement autour d'un axe vertical; elle définit ce que l'on appelle souvent la direction du *nord magnétique*.

Voici les éléments du champ magnétique terrestre au 1er janvier 1958, à la station de Chambon-la-Forêt :

Déclinaison $\delta = -6°34'$.
Inclinaison $i = +64°08'$.
Intensité de la composante horizontale

$$B_1 = 0{,}20295 \text{ gauss} \quad \text{ou} \quad 2 \times 10^{-5} \text{ tesla.}$$

● EXEMPLES. — 1. *Sachant que la composante horizontale de l'induction magnétique terrestre vaut $B_1 = 0{,}2$ gauss, que $i = 60°$, calculer la composante verticale B_2 et l'induction terrestre B.*

La *figure 113* montre que : $B_2 = B_1 \operatorname{tg} i$ et $B = \dfrac{B_1}{\cos i}$.

$$B_2 = 0{,}2 . \operatorname{tg} 60° = 0{,}346 \text{ gauss} \quad \text{ou} \quad 346 . 10^{-7} \text{ tesla}$$

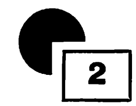
$$B = \frac{0{,}2}{\cos 60°} = 0{,}4 \text{ gauss} \quad \text{ou} \quad 4 . 10^{-5} \text{ tesla}$$

2. *Au 1er janvier 1943, à l'Observatoire de Chambon-la-Forêt on a trouvé pour les composantes horizontales et verticales de l'induction terrestre les valeurs respectives : $B_1 = 0{,}201$ gauss et $B_2 = 0{,}416$ gauss.*
Calculer la valeur de l'inclinaison.

La *figure* montre que : $\operatorname{tg} i = \dfrac{B_2}{B_1}$

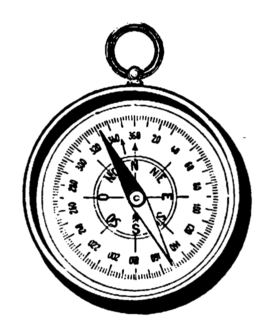
$$\operatorname{tg} i = \frac{0{,}416}{0{,}201} = 2{,}07.$$

Une table de lignes trigonométriques donne immédiatement :
$i = 64°14'$.



APPLICATIONS — VARIATIONS

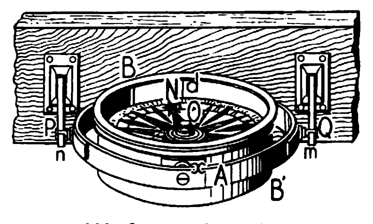
136. Boussole de déclinaison. — La boussole de déclinaison est constituée par une aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical. L'aiguille est soumise à l'action de l'induction magnétique terrestre; on l'équilibre de façon que la composante verticale de cette induction ne fasse pas baisser la pointe nord. Elle est alors sollicitée seulement par la composante horizontale de l'induction terrestre et indique la direction du « nord magnétique ». Les pointes de l'aiguille se déplacent devant un cercle gradué en degrés (*fig. 116*). Si l'on connaît la valeur de la déclinaison δ, on en déduit la direction du nord géographique N, ce qui permet de s'orienter (*fig. 117*).



116. Boussole de déclinaison.

117.

Dans les compas de marine ou d'aviation, le barreau aimanté est fixé à une rose des vents (*fig. 118*) disque sur lequel est tracée une étoile à 32 branches représentant les points cardinaux et leurs subdivisions. Le diamètre Nord-Sud de la rose coïncide avec l'axe magnétique du barreau. L'ensemble est monté comme dans une boussole ordinaire, mais la boîte en cuivre BB′ est portée par une suspension à la cardan, par deux axes *mn*, *xy*. La boîte, fortement lestée en B′, reste ainsi toujours horizontale. On règle la marche du navire en maintenant telle graduation de la rose des vents en regard de la ligne de foi *d* gravée sur la boîte et matérialisant la direction de marche.



118. Compas de marine.

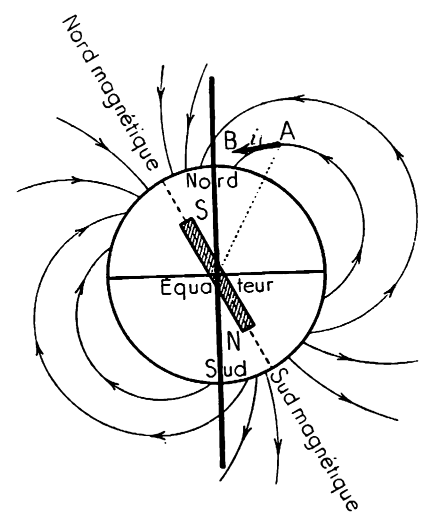
Remarque : Plus de 1 000 ans avant notre ère, les Chinois se dirigeaient sur mer à l'aide d'une aiguille aimantée flottante qui entraînait une figurine représentant une tête d'homme montrant le sud.

◇ **137. Distribution générale du champ magnétique terrestre.** — La distribution générale du champ terrestre rappelle celle qui serait due à un aimant situé au centre du globe, disposé suivant un diamètre ne coïncidant pas avec la ligne des pôles. Les points où ce diamètre (*fig. 119*) perce la surface de la terre peuvent être considérés comme des pôles magnétiques (ou pôles de Gauss); ils ne coïncident pas avec les pôles géographiques. Le pôle nord de Gauss serait situé au N.-O. du Groenland.

La *figure 119* donne ainsi une représentation du spectre magnétique terrestre : en un point A, par exemple, dans l'hémisphère nord, l'induction terrestre, tangente à la ligne de force passant par A pointe vers le sol; l'angle d'inclinaison est *i*.

Pour Paris le nord magnétique se trouvant à l'ouest du nord géographique, la déclinaison est occidentale. La déclinaison serait nulle en tous les points d'un méridien contenant à la fois le Nord géographique et le Nord magnétique.

• **Remarque :** On voit sur la *figure 119* que les lignes de force du champ terrestre rentrent dans la terre au pôle nord magnétique qui devrait donc, pour cette raison, être appelé un pôle sud magnétique.



119. Spectre magnétique de la Terre.

◇ 138. Variations de l'induction magnétique terrestre. —

La déclinaison et l'inclinaison varient à la surface du globe et, en un lieu donné, avec le temps.

La *figure 120* représente une carte magnétique de la France; on y a tracé des lignes d'égale déclinaison ou *isogones* en joignant tous les points qui, au même instant, ont même déclinaison. Ces isogones sont relativement voisines des méridiens. On obtient des *isoclines* en joignant les points d'égale inclinaison; ces lignes se rapprochent des parallèles, bien que faisant en France avec ceux-ci un angle voisin de 9°. L'amplitude des variations de la déclinaison et de l'inclinaison est suffisamment faible pour que, dans une région de quelques kilomètres carrés, on puisse considérer l'induction magnétique terrestre comme uniforme.

En un lieu donné, la déclinaison et l'inclinaison varient avec le temps. On distingue ainsi des variations *séculaires*, *annuelles*, *diurnes* et *accidentelles*. Voici les variations séculaires connues à Paris, pour la déclinaison :

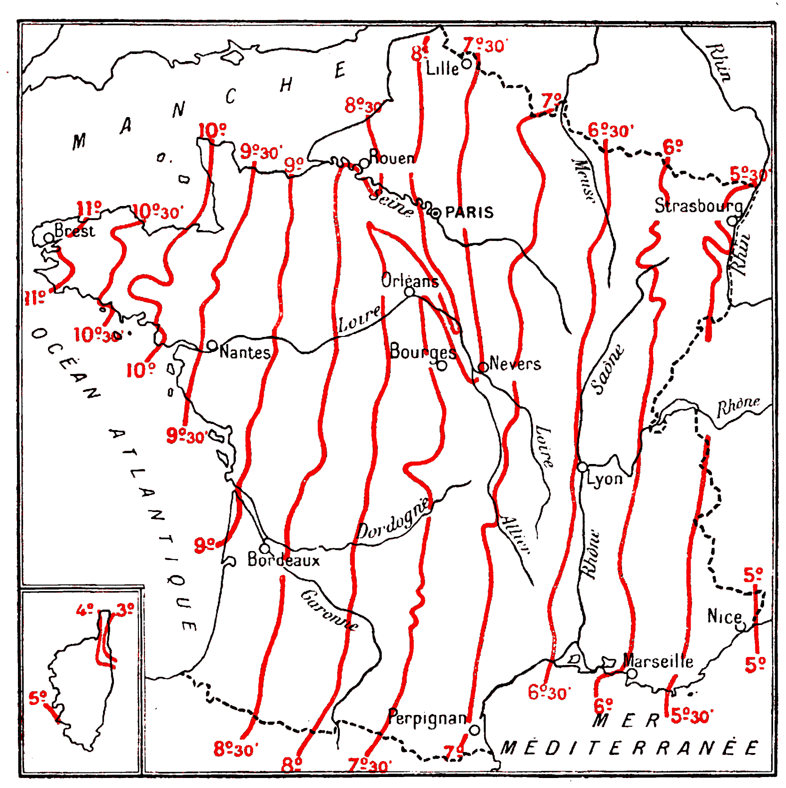
1556	1666	1814	1956	1957	1958
+ 8°	0°	— 22°18′ minimum	— 6°48′	— 6°41′	— 6°34′

Elle décroît d'environ 7′ par an; la période du phénomène, temps au bout duquel il se reproduit identique à lui-même, serait de l'ordre de 736 ans.

Les variations annuelles se traduisent par une diminution de la déclinaison du printemps au milieu de l'été, suivie d'une augmentation en automne.

Chaque jour la déclinaison passe par un minimum vers 8 heures et un maximum vers 14 heures, l'écart pouvant atteindre 8′ à 10′.

Des perturbations accidentelles ou *orages magnétiques* accompagnent l'apparition de taches solaires et d'aurores boréales; elles sont dues à l'induction magnétique intense produite par une émission d'électrons atteignant notre globe. Cette décharge électrique provoque une vive luminescence dans les gaz raréfiés de la haute atmosphère : ce sont les aurores boréales.



Document de l'Institut Géographique National.

120. Carte magnétique de la France au 1er janvier 1953.

◀ RÉSUMÉ ▶

Il existe à la surface de la terre un champ magnétique appelé champ magnétique terrestre. La direction de l'induction magnétique est définie par deux angles : la ***déclinaison,*** *angle que fait le méridien magnétique, plan vertical contenant l'aiguille aimantée avec le méridien géographique et l'****inclinaison,*** *angle de l'induction terrestre avec le plan horizontal. A Paris la déclinaison est occidentale et vaut — 7° environ; l'inclinaison est positive et voisine de 64°. La composante horizontale de l'induction magnétique terrestre est voisine de 0,2 gauss.*

La ***boussole de déclinaison*** *est constituée par une aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical; elle s'oriente vers le Nord magnétique; si on connaît la déclinaison du lieu où l'on se trouve, on en déduit la direction du Nord géographique.*

La déclinaison et l'inclinaison varient avec le lieu et en chaque lieu avec le temps.

★ EXERCICES ★

124. — Calculer la valeur de l'induction terrestre et celle de sa composante verticale en un lieu où sa composante horizontale vaut $196 . 10^{-7}$ Vb/m^2 et l'inclinaison $i = 64°30'$. — **Rép.** : *$B = 455,3 \times 10^{-7}$ tesla; $B_v = 411$ tesla.*

125. — Une aiguille aimantée mobile dans toutes les directions et suspendue par son centre de gravité se maintient horizontale si l'on charge son pôle sud de 5 milligrammes. Calculer la masse magnétique de son pôle nord. On prendra : composante horizontale : 0,2 gauss; $i = 60°$; 1 gramme-poids = 980 dynes.

126. — Quelle est la valeur de l'inclinaison au pôle nord magnétique? au pôle sud magnétique? — **Rép.** : *$i = + 90°$; $i = - 90°$.*

127. — Le diamètre 180 — 0 d'une boussole est dirigé sur le nord géographique. La pointe de l'aiguille aimantée indique $\delta = 9°$ occidentale; on retourne l'aiguille face pour face : on lit $\delta' = 10°$ occidentale. Quelle est la cause de la différence des lectures? Quelle est la valeur de la déclinaison?

128. — Une aiguille aimantée mobile autour d'un axe horizontal (boussole d'inclinaison) peut d'abord se mouvoir dans le plan du méridien magnétique; elle indique alors l'angle d'inclinaison i. Quel angle indiquera-t-elle si on fait tourner son plan de 90°? — **Rép.** : *90°.*

129. — Quelles sont approximativement les valeurs de la déclinaison et de l'inclinaison aux antipodes d'un lieu où elles sont respectivement δ et i?

130. — Une aiguille aimantée est mobile autour d'un axe vertical. Soumise au champ terrestre et à un autre champ uniforme qui est perpendiculaire au méridien magnétique, elle prend une orientation à 60° du méridien magnétique. Quelle est l'intensité du deuxième champ? Composante horizontale de l'induction terrestre : 0,2 gauss. — **Rép.** : *$B = 346 . 10^{-7}$ tesla.*

131. — Un champ d'induction magnétique d'intensité $B = 10^{-5}$ *tesla* fait avec le méridien magnétique un angle variable θ; il se compose avec la composante horizontale $B_0 = 2 . 10^{-5}$ tesla du champ terrestre. Construire la résultante B_1 de ces deux inductions; cette résultante fait avec B_0 un angle α. Trouver géométriquement le lieu de l'extrémité de B_1; en déduire que α passe par un maximum et calculer la valeur de ce maximum.,
Rép. : *le lieu est un cercle de rayon égal à* B *dont le centre est l'extrémité de* B_0; *valeur maximum de $\alpha = 30°$.*

132. — Reprendre le même exercice dans le cas où $B = 3 . 10^{-5}$ tesla.

III. ÉLECTROMAGNÉTISME

INTRODUCTION

ANALOGIES DES AIMANTS ET DES COURANTS

■ **139. Les courants créent un champ magnétique.** — Plaçons au voisinage d'un conducteur (*fig. 121*), une bobine circulaire plate par exemple, une petite aiguille aimantée mobile sur pivot. En l'absence de courant, cette aiguille s'oriente dans le plan du méridien terrestre. Dès que l'on fait passer le courant, elle dévie; ceci montre qu'il existe un champ magnétique au voisinage du circuit. L'induction magnétique ainsi créée par le courant a les mêmes propriétés que l'induction magnétique créée par un aimant. On peut réaliser des spectres de limaille avec des courants comme avec des aimants.

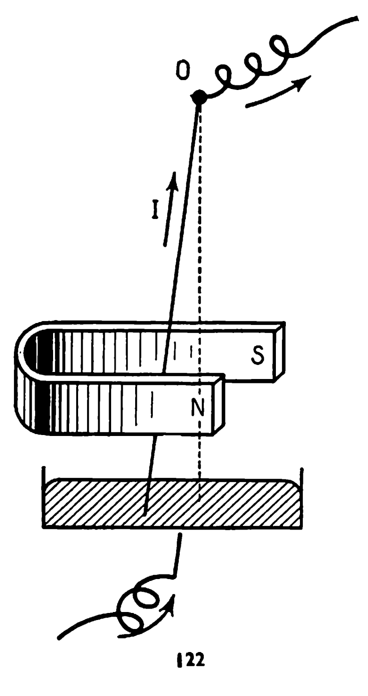
▶ *Un courant électrique crée dans son voisinage un champ magnétique.*

Nord magnétique

n

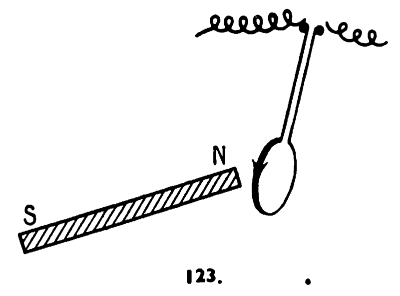
121.

■ **140. Un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à des forces.** — Il suffit de reprendre l'expérience de la *figure 2* en soumettant le fil vertical à l'induction uniforme d'un aimant en fer à cheval (*fig. 122*), ou encore d'approcher un barreau aimanté d'une bobine



122

parcourue par un courant (*fig. 123*), pour observer un déplacement du conducteur mobile : celui-ci est donc soumis à des forces.



123.

Le champ d'induction agissant sur un courant peut aussi être produit par un autre courant comme le montre l'expérience de la *figure 124*. Deux bobines très légères sont disposées parallèlement l'une à l'autre et suspendues à des fils souples longs : on constate que si les bobines sont parcourues par des courants de même sens, elles s'attirent, tandis qu'elles se repoussent si les courants sont de sens contraires.

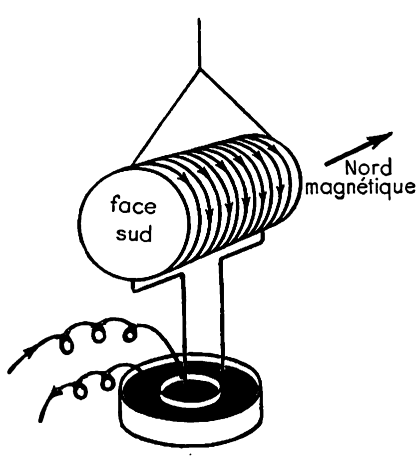
124.

De même une bobine mobile autour d'un axe vertical (*fig. 125*) et parcourue par un courant s'oriente sous l'action de l'induction terrestre.

▶ *Quelle que soit l'origine de l'induction magnétique à laquelle un courant est soumis, cette induction exerce sur ce courant des forces appelées forces électromagnétiques.*

■ **141. But de l'électromagnétisme.** — L'électromagnétisme est l'étude des deux phénomènes ci-dessus : induction magnétique créée par un courant et actions subies par un courant placé dans un champ magnétique.

■ **142. Hypothèse des courants particulaires d'Ampère.** — La création d'un champ magnétique au voisinage d'un courant électrique fut découverte en 1820 par *Œrsted*, physicien danois de l'Université de Copenhague. *Arago* la signala à l'Académie des Sciences et quelques jours après, *André Marie Ampère* (1775-1836) imagina de nombreuses expériences d'électromagnétisme dont il découvrit les lois fondamentales.



125. Orientation d'une bobine dans le champ terrestre.

Il fut ainsi amené à émettre sur la constitution des aimants une hypothèse très différente de celle des masses magnétiques signalée au chapitre XIII. C'est l'hypothèse des courants particulaires : l'induction magnétique créée par un aimant serait due à des courants électriques, courants de particules électrisées, circulant à l'intérieur de toute substance aimantée.

Cette hypothèse ramène donc toute l'étude du magnétisme aux propriétés électromagnétiques des courants. En fait s'il existe bien dans les atomes des courants dus au mouvement des électrons sur leurs orbites, les théories modernes du magnétisme n'attribuent pas toutes les propriétés des substances magnétiques à ces courants, et l'hypothèse d'Ampère se révèle insuffisante à l'échelle de l'atome; mais elle permet d'interpréter les propriétés des aimants tout aussi bien que l'hypothèse de Coulomb sur les masses magnétiques.

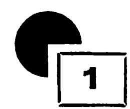


André-Marie Ampère (1775-1836).
Musée de Poleymieux (Rhône).
Peinture anonyme.
Communiqué par la Société des Amis d'Ampère.

CHAPITRE XVI

CHAMPS MAGNÉTIQUES DES COURANTS

1. Étude expérimentale.
2. Solénoïde.
3. Courants rectiligne et circulaire.



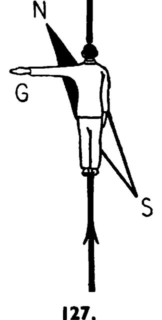
ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

■ **143. Expérience d'Œrsted.** — Disposons parallèlement à une aiguille aimantée horizontale un conducteur rectiligne AB (*fig. 126*) ainsi dirigé du Sud au Nord. Faisons passer un courant dans le fil : l'aiguille dévie; inversons le courant, l'aiguille dévie en sens contraire.

126. Expérience d'**Œrsted.**

▶ *Un courant électrique crée un champ magnétique dans son voisinage.*

■ **144. Règle du bonhomme d'Ampère.** — Le sens du courant étant repéré au moyen d'un voltamètre à eau acidulée (§ 3), Ampère a énoncé la règle suivante donnant le sens de déviation de l'aiguille aimantée (*fig. 127*) :



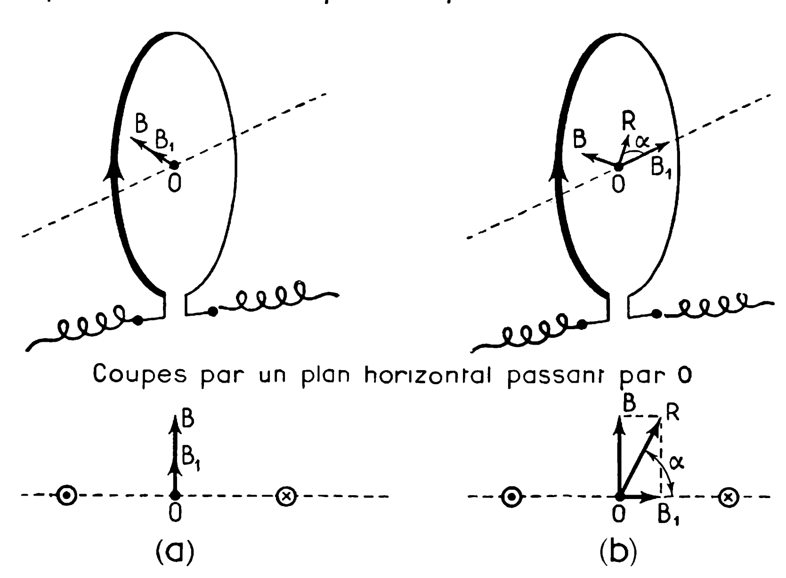
127.

▶ **Règle :** *Le pôle nord de l'aiguille aimantée dévie* ***vers la gauche*** *d'un observateur (bonhomme d'Ampère) qui, regardant l'aiguille, est couché le long du fil de façon que le courant lui entre par les pieds et lui sorte par la tête.*

Le sens de déviation du pôle nord est le sens du

champ magnétique qui est ainsi en chaque point dirigé vers la gauche de l'observateur d'Ampère, regardant le point.

■ **145. Proportionnalité de l'induction à l'intensité de courant.** — Pour étudier expérimentalement l'influence de l'intensité du courant sur la valeur de l'induction magnétique créée par ce courant, il est essentiel de remarquer que cette induction magnétique *dépend de la forme du circuit* et de *la position du point où on mesure l'induction*.



128. Étude expérimentale de l'induction créée par un courant.

Il est alors commode d'utiliser un circuit circulaire formé d'un grand nombre de spires de grand rayon, et d'étudier l'induction magnétique produite au centre de ce circuit. On place au centre de la bobine ainsi obtenue une petite aiguille aimantée mobile sur pivot, dont les déviations sont repérées directement sur un cercle gradué, ou par une méthode optique.

En l'absence du courant l'aiguille aimantée s'oriente dans le plan du méridien magnétique terrestre sous l'action de la composante horizontale B_1 de l'induction terrestre.

1. Plaçons le cadre circulaire de façon que son plan soit perpendiculaire à l'aiguille (*fig. 128 a*) et faisons passer le courant : l'aiguille ne dévie pas. Nous concluons que l'induction due au courant a, dans ces conditions, même direction que l'induction terrestre.

▶ *Au centre d'une bobine circulaire, l'induction créée par le courant est normale au plan du cadre.*

2. Plaçons le plan du cadre parallèlement au méridien magnétique (*fig. 128 b*) et faisons passer le courant. L'aiguille dévie d'un angle α.

Elle est en effet soumise à deux inductions : B_1 due au champ terrestre, et B due au courant, perpendiculaire à B_1 d'après la première expérience. L'aiguille s'oriente suivant la résultante R de ces deux inductions et sa déviation α est telle que : $\operatorname{tg} \alpha = \frac{B}{B_1}$.

On voit que la mesure de α permet de connaître B, B_1 étant connu.

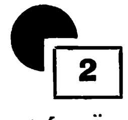
On fait alors varier l'intensité de courant, et on détermine sa valeur au moyen d'un voltamètre, ou plus facilement au moyen d'un ampèremètre *gradué par une méthode électrolytique*. On vérifie aisément que si l'intensité de courant est multipliée par 2, 3, 4, ..., l'induction B est multipliée par le même facteur. Il en serait de même pour un circuit de forme quelconque.

▶ *L'induction magnétique créée en un point par un circuit parcouru par un courant est* ***proportionnelle à l'intensité*** *de ce courant.*

On pourra donc écrire quel que soit le circuit et quel que soit le point considéré :

$$\mathbf{B = kI}$$

k dépend de la forme du circuit, de la position du point et des unités choisies.

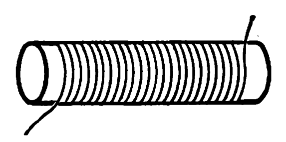


SOLÉNOÏDE

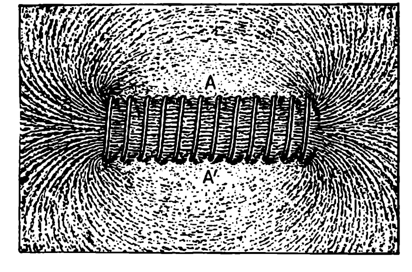
■ **146. Définition; spectre magnétique.** — Un solénoïde est constitué par un fil conducteur régulièrement enroulé sur un cylindre circulaire droit (*fig. 129*); c'est une bobine circulaire longue. On le caractérise par sa longueur L, le nombre de ses spires N, le rayon de chaque spire. Il peut comporter plusieurs couches de fil, évidemment enroulées dans le même sens. L'axe du cylindre est l'axe du solénoïde.

Pour avoir la direction de l'induction magnétique en tous points, étudions le *spectre magnétique* dans un plan passant par l'axe; par symétrie, ce spectre sera le même pour tous les plans analogues.

Prenons donc une feuille de carton horizontale passant par l'axe et saupoudrons-la de limaille de fer. On constate (*fig. 130*) que, à l'intérieur

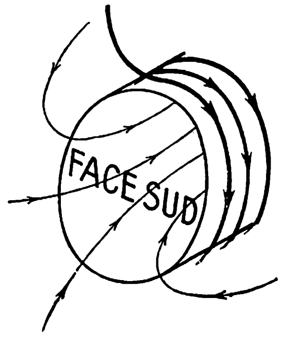


129. Solénoïde.



130. Spectre magnétique d'un **solénoïde.**

du solénoïde, et loin des spires terminales, les lignes de force sont des droites parallèles : l'induction magnétique est alors uniforme. A l'extérieur, les lignes de force ont même aspect que celles obtenues avec un barreau aimanté droit. Leur sens s'obtient par application de la règle du bonhomme d'Ampère (*fig. 131*). Un fait remarquable est que ces lignes de force sont des courbes fermées englobant les spires du solénoïde. Une aiguille aimantée approchée de l'une des faces s'oriente comme au voisinage des pôles d'un barreau aimanté droit. On peut ainsi identifier une face nord et une face sud. Un observateur placé devant la face sud voit le courant circuler dans le sens des aiguilles d'une montre (*fig. 131*).



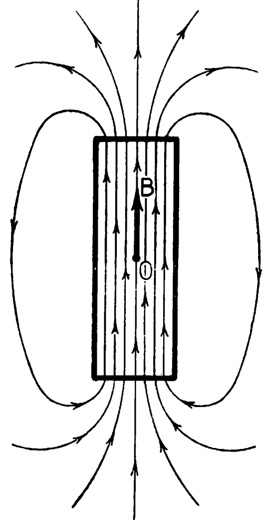
131. Face sud d'un solénoïde.

▶ *A l'intérieur d'un solénoïde et loin des faces terminales, l'induction magnétique est uniforme et parallèle à l'axe.*

▶ *Un solénoïde possède une face nord et une face sud. La face sud est celle devant laquelle il faut se placer pour voir le courant tourner dans le sens des aiguilles d'une montre.*
Les lignes de force pénètrent par la face sud pour sortir par la face nord.

■ **147. Expression approchée de l'induction à l'intérieur d'un solénoïde.** — Prenons un solénoïde très long : sa longueur sera par exemple dix fois plus grande que son diamètre. L'expérience précédente nous a montré que, à l'intérieur et loin des faces, les lignes de force étaient sensiblement des droites parallèles (*fig. 132*) : l'*induction magnétique est sensiblement uniforme.* Son intensité est proportionnelle à l'intensité du courant (§ *145*); on démontre en outre qu'elle est proportionnelle au nombre totale N de spires et inversement proportionnelle à la longueur l du solénoïde. On a donc :

$$B = k \cdot \frac{N}{l} \cdot I.$$



132. Lignes d'induction d'un solénoïde.

Le coefficient k dépend uniquement des unités choisies. Dans le système M. K. S. A., B est exprimé en tesla, I en ampères, l en mètres : le coefficient k est alors $k = \frac{4\pi}{10^7}$, d'où l'expression de l'induction :

$$\underset{\text{tesla}}{B} = \frac{4\pi}{10^7}\frac{N}{l}\underset{\text{m. ampère}}{I} \quad \text{ou} \quad B = \frac{4\pi}{10^7} n_1 I,$$

Si on pose $n_1 = \frac{N}{l}$, n_1 est alors le nombre de spires par mètre de longueur sur la génératrice.

Cette expression n'est qu'approchée : elle s'appliquerait rigoureusement à un solénoïde infiniment long et loin des faces. L'induction passe par un maximum au centre du solénoïde et diminue très légèrement lorsqu'on s'éloigne du centre.

● **EXEMPLE.** — *Un solénoïde de petit rayon, de 40 cm de longueur, comporte au total 800 spires. Quelle est l'intensité du courant qui produira au centre une induction de 2 gauss.*

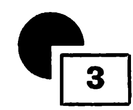
La relation précédente donne :

$$B = \frac{4\pi}{10^7}\cdot\frac{N}{l}\cdot I \quad \text{d'où} \quad I = \frac{10^7 . l . B}{4\pi N}$$

avec $B = 2 \times 10^{-4}$ tesla ; $l = 0{,}4\ m$; $N = 800$.

$$I = \frac{10^7 \times 0{,}4 \times 2 \times 10^{-4}}{4\pi \times 800} = \frac{1}{4\pi}$$

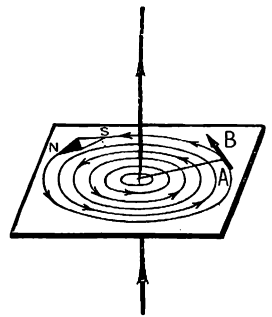
soit $I = 0{,}0796$ A.



COURANTS RECTILIGNE ET CIRCULAIRE

◇ **148. Spectre magnétique d'un courant rectiligne.** — Un long fil vertical (*fig. 133*) est parcouru par un courant. Il traverse une feuille de carton horizontale que nous saupoudrons de limaille de fer. Les grains de limaille dessinent des lignes de force : ce sont des circonférences centrées sur le fil. Si le courant est suffisamment intense pour que son induction magnétique soit beaucoup plus grande que la composante horizontale de l'induction terrestre, une petite aiguille aimantée posée sur le carton se place tangentiellement aux lignes de force. Les lignes de force sont orientées vers la gauche du bonhomme d'Ampère.

▶ *Les lignes de force d'un courant rectiligne indéfini sont des circonférences centrées sur le courant, orientées vers la gauche du bonhomme d'Ampère.*



133. Spectre magnétique du **courant rectiligne.**

◇ **149. Valeur du champ magnétique.** — Les deux physiciens français Biot et Savart ont étudié la variation de l'intensité de l'induction magnétique avec la distance au fil et montré que

ce champ variait en raison inverse de cette distance, et qu'elle était *toujours proportionnelle à l'intensité du courant.*

▶ *L'induction magnétique produite en un point* A *par un courant rectiligne indéfini est un vecteur tangent au cercle passant par* A *et centré sur le fil, dirigé vers la gauche du bonhomme d'Ampère qui regarde le point* A. *Elle a pour valeur :*

$$\underset{\text{tesla}}{B} = \frac{2}{10^7}\,\frac{\overset{\text{ampère}}{I}}{\underset{\text{m}}{d}}.$$

● **EXEMPLE.** — *Quelle est l'intensité du courant rectiligne indéfini qui crée à 5 cm du fil une induction d'intensité égale à celle de la composante horizontale de l'induction terrestre?*

On doit avoir $B = 0{,}2$ **gauss** ou 2×10^{-5} **tesla**

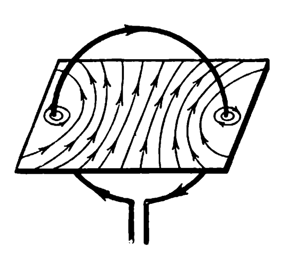
pour $d = 0{,}05$ m.

$$I = \frac{10^7}{2}.B.d = \frac{10^7}{2} \times 2.10^{-5} \times 0{,}05$$

soit : $I = 5$ **ampères.**

◇ **150. Étude du spectre magnétique d'une bobine circulaire plate.** — Un courant circulaire est un courant qui parcourt un fil conducteur en forme de circonférence; si le fil fait plusieurs tours juxtaposés, on a une bobine circulaire plate.

Étudions le spectre magnétique dans un plan passant par l'axe; par symétrie, ce spectre sera le même pour tous les plans analogues. Prenons donc une feuille de carton horizontale passant par l'axe (*fig. 134*), et saupoudrons-la de limaille de fer.



134. Spectre magnétique d'un **courant circulaire.**

Nous constatons que les lignes de force sont des courbes fermées autour de l'un des points où le cercle perce le carton; elles transpercent donc le plan du courant circulaire et l'application de la règle du bonhomme d'Ampère (s'exercer à l'appliquer sur la figure) montre qu'elles pénètrent toutes à travers le cercle dans le même sens. Il est facile de vérifier la règle suivante :

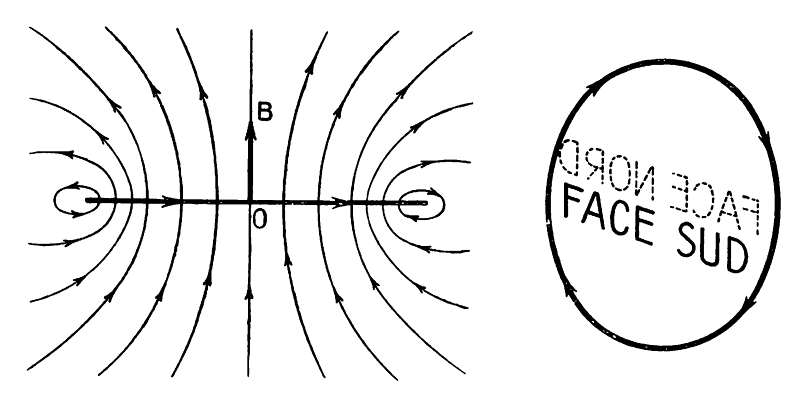
▶ **Règle.** *Les lignes de force d'une bobine circulaire plate pénètrent à l'intérieur de la bobine par la face devant laquelle il faut se placer pour voir le courant tourner dans le sens des aiguilles d'une montre.*

◇ **151. Analogie avec un aimant plat.** — Imaginons un aimant très plat, sorte de disque aimanté coïncidant avec le plan du cercle précédent (*fig. 135*) : ses lignes de force sortiraient par une face, le pôle nord, pour rentrer par l'autre, le pôle sud. Par analogie, on peut énoncer la proposition suivante :

▶ *Une bobine circulaire plate possède une face nord et une face sud. La face sud d'un tel circuit est celle devant laquelle il faut se placer pour voir le courant tourner dans le sens des aiguilles d'une montre.*

¶ **Remarque :** Cette analogie avec un aimant plat sera confirmée dans l'étude des actions subies par une telle bobine placée dans un champ magnétique.

◇ **152. Valeur de l'induction au centre de la bobine.** — L'induction magnétique créée en un point quelconque n'a pas une expression simple. On



135. Une bobine circulaire plate est assimilable à un aimant plat.

démontre qu'au centre du cercle, cette induction est normale au plan de la spire (*voir* § : *153*), dirigée de la face sud vers la face nord et a pour valeur :

$$\underset{\text{tesla}}{B} = \frac{2\pi}{10^7} \frac{N.I}{R} \frac{\text{ampère}}{\text{m}}$$

où R est le rayon de la bobine, N le nombre de spires.

● **EXEMPLES.** — **1.** *Avec un fil conducteur de 10 mètres, on réalise une bobine plate comprenant 20 spires circulaires positives de même rayon. Calculer l'induction magnétique au centre de cette bobine lorsqu'elle est le siège d'un courant de 3 ampères.*

Chacune des spires a une longueur de **0,5** m et un rayon

$$R = \frac{0,5}{2\pi} = \frac{25}{100\,\pi}\,m.$$

La relation précédente donne alors :

$$B = \frac{2\,\pi \times 20 \times 8 \times 100\,\pi}{10^7 \times 25} = 12,6.10^{-4}\ \text{tesla.}$$

2. *Sur un cerceau de 80 cm de diamètre, on a enroulé 20 spires circulaires jointives. Quelle intensité doit-on faire passer dans ces spires pour que l'induction magnétique créée au centre du cerceau par ce circuit soit égale à 0,2 gauss? Si le cerceau est dans le plan du méridien magnétique, quelle est l'induction résultante de la composition de l'induction précédente et de la composante horizontale du champ terrestre?*

L'induction due au courant a pour valeur :

$$B = \frac{2\,\pi}{10^7}\frac{N.I}{R}, \quad \text{d'où :} \quad I = \frac{10^7.B.R}{2\,\pi\,N}$$

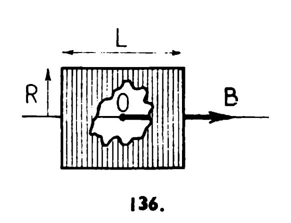
$$= \frac{10^7 \times 0,2 \times 10^{-4} \times 0,4}{2\,\pi \times 20} = 0,64\ \text{A}.$$

L'induction due au courant étant normale au cadre, est perpendiculaire à la composante horizontale de l'induction terrestre : comme elles ont même intensité, le parallélogramme de composition des vecteurs est un carré dont la diagonale a pour valeur

$$B' = B\sqrt{2} = 0,2\sqrt{2}\ \text{gauss.}$$

$$B' = 0,28\ \text{gauss ou}\ 28.10^{-6}\ \text{tesla.}$$

¶ **Remarque** : L'induction magnétique au centre d'une spire circulaire varie en raison inverse de son rayon. Il peut donc paraître curieux que l'induction au centre d'un solénoïde formé par une juxtaposition de spires circulaires de même axe soit indépendante du rayon de ce solénoïde. C'est que la formule donnée précédemment n'est qu'approchée. Le calcul rigoureux donne pour l'induction au centre du solénoïde de longueur L et de rayon R (*fig. 136*) l'expression :



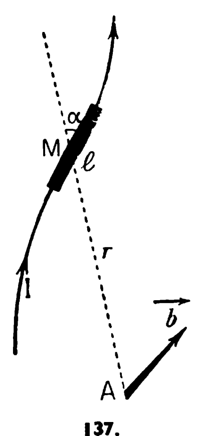
136.

$$B = \frac{4\pi}{10^7} \frac{NI}{\sqrt{L^2 + 4R^2}}.$$

Si la bobine est très plate, L = 0, $B = \frac{2\pi}{10^7} \frac{NI}{R}$;

si elle est très longue, R^2 est négligeable devant L^2, on obtient : $B = \frac{4\pi}{10^7} \frac{NI}{L}$.

◇ 153. Formule de Laplace, Biot et Savart. — Laplace, pour expliquer les résultats trouvés par Biot et Savart dans l'étude expérimentale du champ magnétique créé par les courants a énoncé la loi suivante :



137.

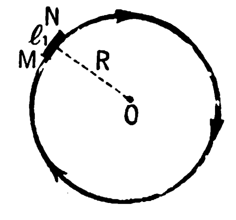
L'induction magnétique créée en un point A par un courant peut s'obtenir en composant les inductions dues à des portions de courant. L'induction créée par une portion rectiligne de courant de longueur *l*, à la distance *r* du point A, est perpendiculaire au plan défini par le point A et l'élément *l*, dirigée vers la gauche du bonhomme d'Ampère regardant le point A (*fig. 137*) et a pour intensité

$$b = \frac{1}{10^7} \frac{I.l.\sin\alpha}{r^2}$$

α étant l'angle du courant avec la droite AM.

Montrons l'application de cette loi dans un cas simple : celui d'une spire circulaire et calculons le champ en son centre (*fig. 138*). Toutes les inductions sont portées par la perpendiculaire en O au plan du cercle et ont même sens. Il suffit de les ajouter :

$$B = b_1 + b_2 + \ldots.$$



138.

L'induction b_1 correspondant à la portion MN = l_1, tel que α = 90° est :

$$b_1 = \frac{1}{10^7} \frac{I.l_1}{R^2}$$

d'où

$$B = \frac{1}{10^7} \frac{I}{R^2} (l_1 + l_2 + \ldots)$$

Mais $l_1 + l_2 + \ldots = 2\pi R$, **longueur de la circonférence. Finalement :**

$$B = \frac{1}{10^7} \frac{I}{R^2} 2\pi R = \frac{2\pi}{10^7} \frac{I}{R}.$$

◀ *RÉSUMÉ* ▶

Un circuit parcouru par un courant crée dans son voisinage un ***champ magnétique.***

Le sens de l'induction magnétique en un point est donné par la ***règle du bonhomme d'Ampère*** *: l'induction est dirigée vers la gauche d'un observateur placé le long du circuit, le courant entrant par ses pieds et sortant par sa tête, et qui regarde le point considéré.*

L'induction magnétique créée en un point par un circuit parcouru par un courant dépend de la forme du circuit et la position du point considéré mais elle est ***proportionnelle à l'intensité*** *du courant :*

$$B = kI.$$

Un ***solénoïde*** *ou bobine longue a même spectre qu'un barreau aimanté droit, mais les lignes de force sont fermées à l'intérieur du solénoïde; elles sont sensiblement parallèles au voisinage du centre où l'induction est sensiblement uniforme. Un solénoïde est analogue à un aimant droit : comme lui, il possède une face nord et une face sud. La* ***face sud*** *est celle devant laquelle il faut se placer pour voir le courant tourner dans le sens des aiguilles d'une montre.*

L'induction magnétique au centre a pour valeur approchée :

$$B = \frac{4\pi}{10^7}\frac{N}{l} I \text{ ampère}$$

tesla m

Les lignes de force d'un courant rectiligne indéfini sont des circonférences centrées sur le courant, orientées vers la gauche du bonhomme d'Ampère. L'intensité de l'induction magnétique, à la distance d du fil a pour valeur :

$$B = \frac{2}{10^7}\frac{I}{d} \text{ (en M. K. S. A.).}$$

Le spectre magnétique d'une bobine circulaire est le même que celui d'un aimant plat. La bobine possède une face nord et une face sud. L'induction au centre est normale au plan de la bobine, sort par sa face nord et a pour intensité :

$$B = \frac{2\pi}{10^7}\frac{NI}{R} \text{ (en M. K. S. A.)}$$

★ EXERCICES ★

133. — Un solénoïde long porte 5 couches de fil isolé, à spires jointes; chaque fil, isolant compris, a un diamètre de 1 mm. Quelle est la valeur de l'induction magnétique au centre si le courant a une intensité de 1 milliampère?
Rép. : *0,0628 gauss.*

134. — L'axe du solénoïde précédent est perpendiculaire au méridien magnétique. En son centre se trouve une boussole de déclinaison. Quel est l'angle de rotation de l'aiguille, la composante horizontale de l'induction terrestre valant 0,2 gauss?

135. — Sur une bobine de 50 cm de longueur et de 10 cm de diamètre on enroule régulièrement 200 m de fil conducteur. On fait passer dans ce solénoïde un courant de 2 ampères. Calculer l'induction magnétique au centre. — **Rép.** : *32.10⁻⁴ tesla ou 32 gauss.*

136. — Un solénoïde est formé par un enroulement à spires jointives de fil de cuivre émaillé (l'isolant a une épaisseur négligeable). Le diamètre de ce fil est $d = 0{,}5$ mm. On mesure la résistance du solénoïde et on trouve : $R = 40\,\Omega$. Calculer la longueur de fil enroulé. L'induction au centre étant $B = 5 \times 10^{-3}$ tesla, calculer l'intensité du courant qui parcourt ce solénoïde. Déterminer le rayon du solénoïde s'il est formé d'une seule couche de fil et si sa longueur est 1 mètre. Résistivité du cuivre : $\rho = 1{,}6 \times 10^{-8}$ ohm × mètre.

137. — L'induction magnétique au centre d'un solénoïde a pour valeur : $B = 25 \times 10^{-3}$ tesla lorsque ce solénoïde est parcouru par un courant de 4 ampères. L'enroulement étant formé par du fil de 1 mm de diamètre (isolant compris) et étant à spires jointives, déterminer le nombre de couches de fil. On prendra $4\pi = 12{,}5$. — **Rép.** : *$n = 5$.*

138. — On dispose un solénoïde de façon que son axe soit perpendiculaire au méridien magnétique. Une boussole de déclinaison placée au centre dévie de 30° lorsque l'intensité du courant qui traverse le solénoïde est de 1 ampère. Calculer l'intensité du courant traversant le solénoïde lorsque la déviation est de 60°. Déterminer la déviation si cette intensité devient égale à 1,732 A. Sachant que la composante horizontale de l'induction terrestre vaut $B_1 = 0{,}2$ gauss, calculer le nombre de spires par mètre de longueur de génératrice du solénoïde.

139. — Un courant rectiligne indéfini de 20 ampères passe dans un fil de 2 mm de diamètre. Quelles sont les inductions contre le fil et à 2 cm de l'axe du fil ?
Rép. : *40 gauss, 2 gauss.*

140. — Deux courants rectilignes indéfinis sont parallèles, de sens contraire, et distants de 10 cm ; l'un A est de 15 ampères, l'autre B de 5 ampères. A quelle distance de A l'induction résultante est-elle nulle ?

141. — Deux courants rectilignes indéfinis, de I ampère chacun, se croisent à angle droit (sans contact). Calculer l'induction résultante sur une bissectrice quelconque des 4 angles droits, à une distance d du point de croisement.

Rép. : *nulle ou* $\frac{4\,I\sqrt{2}}{10^7 d}$ *tesla.*

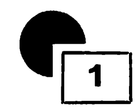
142. — Une bobine plate de 5 cm de rayon et comportant 50 spires est parcourue par un courant I. Son plan coïncide avec le méridien magnétique. Elle porte en son centre une boussole de déclinaison. La composante horizontale de l'induction terrestre vaut 0,2 gauss. Calculer I pour que l'aiguille de la boussole tourne de 45°.

143. — Une bobine plate de 10 cm de rayon et comportant 100 spires est parcourue par un courant de 0,008 ampère. Son plan coïncide avec le méridien magnétique ; elle porte en son centre une boussole de déclinaison. La composante horizontale de l'induction magnétique terrestre vaut $2 . 10^{-5}$ tesla. On fait tourner cette bobine de façon que, à l'équilibre, l'aiguille aimantée soumise aux deux champs reste dans le plan de la bobine. Calculer l'angle de rotation de la bobine à partir de sa position initiale. — **Rép.** : *14° 30′.*

CHAPITRE XVII

ACTION D'UNE INDUCTION MAGNÉTIQUE SUR UN COURANT

1. Loi de Laplace.
2. Flux d'induction.
3. Action d'un courant sur un courant.



LOI DE LAPLACE

■ **154. Expérience fondamentale.** — Un circuit parcouru par un courant crée une induction magnétique; il exerce sur un pôle d'aimant une force F qu'on peut supposer répulsive. Par réaction, on peut donc prévoir que ce pôle d'aimant exercera sur le circuit une force égale et opposée à F. Ces deux phénomènes, création d'une induction magnétique par un courant ou action d'une induction magnétique sur un courant sont donc réciproques.

Reprenons l'expérience faite au chapitre I pour en préciser les conditions. Suspendons un fil de cuivre à un point O; laissons plonger son extrémité inférieure (*fig. 139*) dans un bain de mercure et disposons un aimant en fer à cheval de façon que le fil traverse la région uniforme. Faisons passer un courant intense dans le fil : il se déplace perpendiculairement aux lignes de force : si on fait tourner l'aimant dans un plan horizontal de façon à changer la direction NS des pôles, le déplacement du fil se modifie de façon à s'effectuer toujours dans un plan perpendiculaire aux lignes de force.

Inversons le courant : le déplacement se fait dans le même plan, mais en sens inverse.

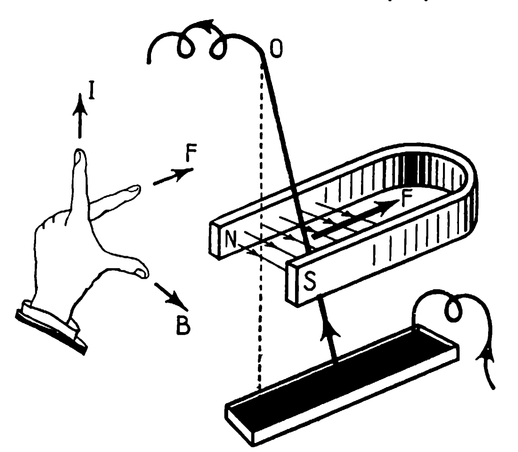
Modifions le sens de l'induction en retournant l'aimant pôle pour pôle : le déplacement change de sens.

▶ *La force d'origine électromagnétique qui s'exerce sur une portion de circuit placée dans un champ magnétique est située dans un plan perpendiculaire aux lignes de force. Elle change de sens, soit avec le courant, soit avec l'induction.*

■ 155. Direction de la force électromagnétique. — La force exercée sur une portion de courant mobile sera définie par :

1° ***son point d'application*** : c'est le ***milieu*** de l'élément de courant si le champ est uniforme.

2° ***sa ligne d'action*** : c'est la perpendiculaire au plan défini par les directions de l'induction et du courant.



139. Action d'une induction magnétique sur un courant.

3° ***son sens*** : il est donné :

— soit *par la règle du bonhomme d'Ampère* : placé le long du courant à la façon habituelle, il regarde dans le sens du champ (les lignes de forces fuient devant lui); la force est dirigée vers sa gauche.

— soit *par la règle des 3 doigts de la main gauche* : on écarte naturellement à angles droits le pouce, l'index et le médius de la main gauche; on place le pouce dans la direction du champ, l'index dans la direction du courant, le médius donne la direction de la force (*fig. 139*).

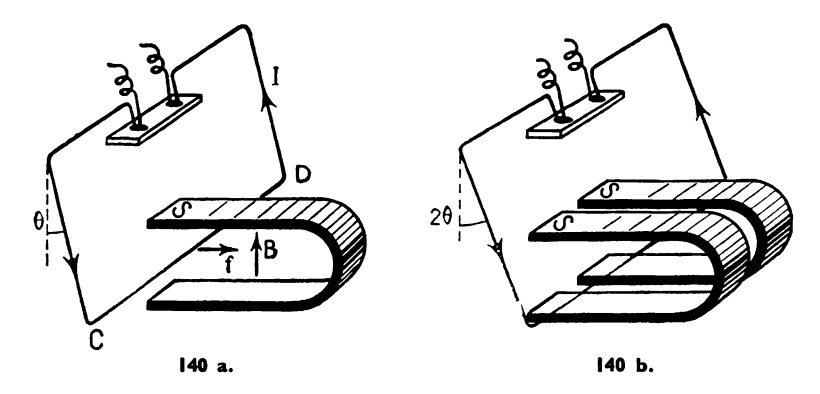
On notera que l'ordre *naturel* pouce, index, médius, correspond à l'ordre *alphabétique* champ, courant, force.

■ 156. Étude expérimentale de l'intensité de la force électromagnétique. — On peut étudier l'influence des différents facteurs qui interviennent dans l'intensité de la force électromagnétique au moyen du dispositif classique suivant : un cadre parcouru par le courant I repose par deux pointes dans des godets de mercure, ce qui le rend mobile autour d'un axe passant par ces deux pointes (*fig. 140 a*). Le côté horizontal CD est placé dans l'entrefer d'un aimant en fer à cheval et se déplace dans une zone d'induction uniforme. Par suite de l'action de l'induction B sur la portion de CD qui s'y trouve soumise, le cadre tourne d'un angle θ. Si l'angle θ est faible, la force agissante est proportionnelle à θ. On peut mesurer θ par une méthode optique au moyen d'un miroir solidaire du cadre.

L'expérience montre que *la force électromagnétique est proportionnelle à l'intensité du courant* : θ double quand I double.

En plaçant deux aimants identiques côte à côte (*fig. 140 b*), on double très approximativement la portion de CD soumise à l'induction : θ double. La force électromagnétique est *proportionnelle à la longueur de la portion de circuit* soumise à l'induction.

Si on place maintenant les deux aimants bout à bout (*fig. 141 a*), on double sensiblement B puisqu'on double les masses magnétiques

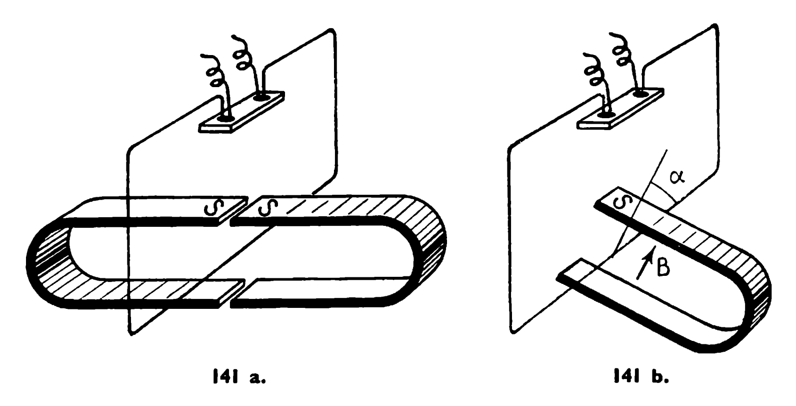


140 a. **140 b.**

produisant B : θ est sensiblement doublé. La force électromagnétique est *proportionnelle à l'induction.*

Enfin si on fait tourner l'aimant (*fig. 141 b*) on constate que la force varie avec l'angle α que fait le vecteur induction avec le conducteur parcouru par le courant, et qu'elle est proportionnelle au sinus de cet angle.

Les mesures expérimentales précédentes ne sont qu'approchées

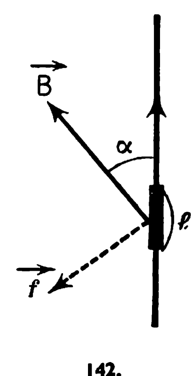


141 a. **141 b.**

et, nous admettrons la loi suivante appelée ***loi de Laplace*** qui résume l'ensemble de cette étude.

▶ ***Loi de Laplace.*** *Une portion de conducteur de longueur l, parcourue par un courant d'intensité* I, *soumise à une induction magnétique* B *qui fait un angle α avec le conducteur (fig. 142) subit une force perpendiculaire au plan défini par le courant et l'induction, dirigée vers la gauche d'un observateur d'Ampère qui regarde dans le sens de* B *et dont l'intensité est donnée par la relation :*

f	=	I	. l .	**B**	. **sin** α
newton		ampère	m.	tesla	



142.

On remarquera que, avec les unités M. K. S. A., la formule ne comporte aucun coefficient numérique. Si $\alpha = 0$, l'induction étant parallèle au conducteur, la force f est nulle.

● EXEMPLE. — *Dans l'expérience précédente, le courant* I *vaut 8 ampères; l'induction B vaut 500 gauss, s'exerce sur une longueur de 5 cm et fait un angle de 30° avec le courant. Calculer la force subie par ce conducteur.*

Il suffit d'appliquer la loi de Laplace en utilisant les unités M. K. S. A. :

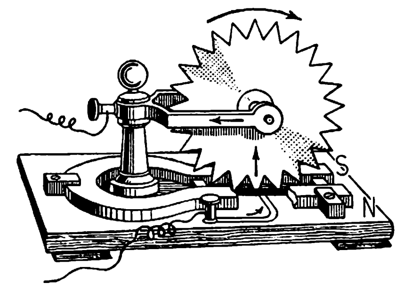
$I = 8$ A; $B = 5.10^{-2}$ tesla

$l = 0{,}05$ m; $\sin\alpha = \frac{1}{2}$. On obtient :

$$f = 8 \times 0{,}05 \times 5 \times 10^{-2} \times \frac{1}{2} = 10^{-2} \text{ newton}$$

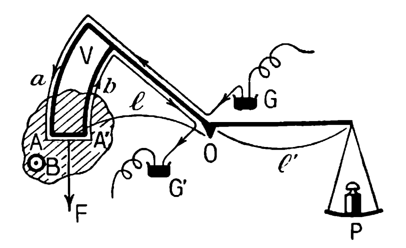
force voisine de 1 *gf*.

■ **157. Roue de Barlow.** — Dans la roue de Barlow, on utilise la force électromagnétique pour produire un mouvement de rotation continue. Une roue en cuivre (*fig. 143*) mobile autour d'un axe horizontal touche un bain de mercure par sa partie inférieure. Elle est placée entre les pôles d'un aimant en fer à cheval NS (coupé en partie sur la figure pour montrer le circuit électrique). Un courant peut traverser la roue en passant par le mercure, la roue, l'axe de rotation et son support. Lorsqu'on établit le courant, la roue se met à tourner. La figure indique le sens du courant et le sens de rotation. L'explication est analogue à celle donnée au paragraphe 141 : la partie de la roue allant du mercure à l'axe est soumise à une force située dans son plan, puisque perpendiculaire à l'induction; cette force perpendiculaire au courant est horizontale. Nous avons donc affaire à un corps mobile autour d'un axe soumis à une force ne passant pas par l'axe : cette force forme avec la réaction de l'axe un couple qui provoque la rotation de la roue. Le rayon vertical s'étant déplacé, est remplacé par un autre et ainsi de suite. On trouvera facilement le sens de rotation par application de la règle des trois doigts. Cette roue de Barlow constitue le premier exemple de moteur électrique, mais de très mauvais rendement à cause des grands frottements sur l'axe, des étincelles au contact du mercure, etc.



143. Roue de Barlow.

◇ **158. Balance de Cotton.** — Un fléau de balance de forme particulière (*fig. 144*) supporte un secteur de verre V, centré sur l'axe de rotation O du fléau. Un fil conducteur reçoit du courant par un contact de mercure G, suit le fléau, le secteur formé d'une barre AA′ dont le prolongement passe par O et des arcs de cercle *a*, *b*, centrés sur O, puis revient en G′ dans un godet de



144. Balance de **Cotton.**

mercure. Supposons la portion AA' soumise à une induction horizontale B, perpendiculaire au plan de figure et dirigée vers l'avant de cette figure : elle est alors soumise à une force verticale F (dont le sens est donné par la règle des trois doigts) vers le bas. Les portions de courant *a*, *b* sont aussi soumises à des forces, mais ces forces étant normales aux arcs de cercles passent par leur centre O et leur moment par rapport à O est nul. Seule la force F déséquilibre la balance; on rétablit l'équilibre au moyen de poids P placés dans l'autre plateau.

Cet appareil sert à la mesure des inductions magnétiques intenses (électro-aimants).

● **EXEMPLE.** — *Dans une balance de Cotton, AA' = 2 cm, l = 20 cm, l' = 32 cm, P = 5 gf, I = 4 A. Calculer la valeur de l'induction mesurée.*

L'équilibre de la balance exige l'égalité des moments des forces par rapport à l'axe :

$$\text{Moment de } \mathbf{F} = \text{Moment de } \mathbf{P}.$$

$$\mathbf{F} \times l = \mathbf{P} \times l'.$$

Plaçons-nous dans le système M. K. S. A. : **F** et **P** sont exprimés en newtons.

$$\mathrm{F} = \mathrm{I}.\overline{\mathrm{AA}'}.\mathrm{B} \qquad \text{car} \quad \alpha = 90^{\circ}, \quad \sin\alpha = 1$$

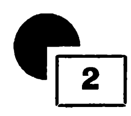
$$\mathrm{F} = 4 \times 0{,}02 \times \mathrm{B} = \frac{8}{100}\,\mathrm{B}$$

$$\mathrm{P} = 5 \times 9{,}81 \times 10.^{-3} \text{ newtons}$$

d'où :

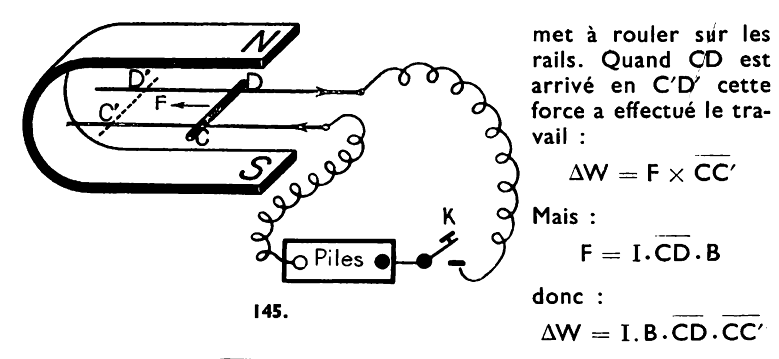
$$\frac{8}{100}\,\mathrm{B} \times 20 = 5 \times 9{,}81 \times 10^{-3} \times 32$$

On trouve **B = 0,981 tesla.**



TRAVAIL DES FORCES ÉLECTROMAGNÉTIQUES FLUX D'INDUCTION

■ **159. Expression du travail des forces électromagnétiques. —** Prenons d'abord le cas simple où l'induction B est perpendiculaire au courant et au déplacement. Dans l'entrefer d'un aimant en fer à cheval plaçons deux rails conducteurs horizontaux (*fig. 145*) sur lesquels peut rouler une tige légère CD. Faisons passer un courant dans le sens de la flèche. La tige CD est soumise à une force F, dont la direction, donnée par la règle des trois doigts est indiquée sur la figure; elle se



145.

met à rouler sur les rails. Quand CD est arrivé en C'D' cette force a effectué le travail :

$$\Delta W = F \times \overline{CC'}$$

Mais :

$$F = I . \overline{CD} . B$$

donc :

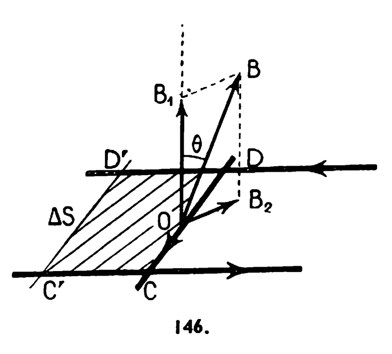
$$\Delta W = I . B . \overline{CD} . \overline{CC'}$$

Le produit $\overline{CD} . \overline{CC'}$ représente la *surface « balayée »* par le conducteur au cours de son déplacement, ou la *variation de surface du circuit*, ΔS. On en déduit :

$$\underset{\text{joule}}{\Delta W} = \underset{\text{ampère}}{I} . \underset{\text{tesla}}{B} . \underset{\text{m}^2}{\Delta S}$$

Considérons maintenant le cas où l'induction B est orientée de façon quelconque, la tige CD étant toujours mobile sur les rails horizontaux (*fig. 146*). Projetons B sur le plan horizontal et sur la verticale Oz normale à la surface balayée; si θ est l'angle de B avec la verticale Oz, cette dernière projection B_1 a pour valeur B cosθ et, comme elle est normale au courant et au déplacement, le calcul du travail de la force qui lui correspond est le même que précédemment. On trouve ainsi :

$$\Delta W = I . B . \Delta S . \cos\theta$$



146.

La composante B_2 de B située dans le plan horizontal agit sur le courant et crée une force verticale normale au déplacement, dont le travail correspondant est nul. Au total, le travail de la force électromagnétique a pour expression générale :

$$\underset{\text{joule}}{\Delta W} = \underset{\text{ampère}}{I} . \underset{\text{tesla}}{B} . \underset{\text{m}^2}{\Delta S} . \cos\theta$$

■ **160. Flux d'induction magnétique.** — Dans l'expression précédente du travail, on voit apparaître le produit B.ΔS.cosθ. On lui a donné le nom de ***flux d'induction magnétique*** grandeur dont l'importance apparaîtra mieux dans le prochain chapitre.

▶ ***Définition.*** *On appelle* ***flux d'induction magnétique*** ΔΦ *à travers un élément de surface* ΔS *le produit de* ΔS *par la projection du vecteur induction sur la normale à* ΔS.

$$\mathbf{\Delta\Phi = B . \Delta S . \cos\theta.}$$

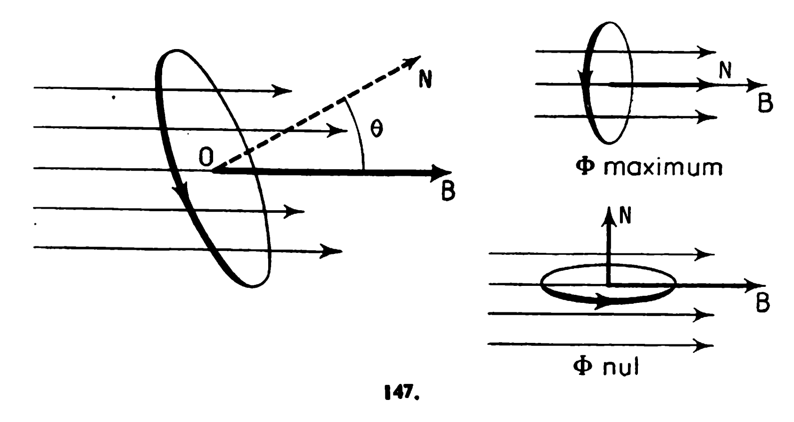
L'unité M. K. S. A. de flux d'induction est le ***weber*** (Wb); c'est de cette unité que dérive en fait l'unité d'induction : le ***tesla*** ou ***weber par · m²***. On obtient finalement.

$\Delta\Phi$	$=$	**B**	.	Δ**S**	.	$\cos\theta$.
weber		tesla		m²		

On utilise aussi le ***maxwell*** : *1 weber vaut 10^8 maxwells.*

¶ **Remarque :** Le maxwell correspond au gauss et au cm². En effet, prenons une induction de 1 gauss et une surface de 1 cm², avec $\theta = 0$, $\cos\theta = 1$.

$$\Delta\Phi = 10^{-4} \times 10^{-4} = 10^{-8} \text{ weber c'est-à-dire un maxwell.}$$



147.

■ **161. Flux d'induction à travers un circuit.** — Prenons le cas d'un circuit plan placé dans un champ d'induction uniforme (*fig. 147*). Nous conviendrons de choisir sur la normale ON au plan du circuit *une direction positive* vers la gauche de l'observateur d'Ampère regardant l'intérieur du circuit : c'est la direction qui va de la face sud du circuit à sa face nord. Si S est la surface plane limitée au contour du circuit, le flux Φ à travers le circuit sera égal à

$$\Phi = B.S.\cos\theta$$

θ est l'angle des directions de $\overrightarrow{ON}$ et de $\overrightarrow{B}$.

Si θ est aigu, le flux Φ est positif; on vérifie que les lignes de force de B entrent par la face sud : le flux Φ désigne donc le flux entrant par la face sud.

Si θ est obtus, Φ est négatif : les lignes de force entrent par la face nord.

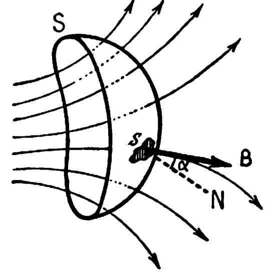
$\theta = 0$ correspond à un flux maximum puisque $\cos\theta = 1$; $\theta = 180°$ correspond à un flux minimum ($\cos\theta = -1$); $\theta = 90°$ correspond à un flux nul, les lignes de force sont dans le plan du circuit qui n'est ainsi traversé par aucune d'elles.

▶ *Le flux d'induction à travers un circuit plan parcouru par un courant est le flux d'induction à travers la surface limitée au contour du circuit. C'est une grandeur algébrique, positive si les lignes d'induction entrent par la face sud du circuit, négative si elles entrent par la face nord.*

◇ **162. Cas général.** — La surface S peut être quelconque et le champ aussi (*fig. 148*) : on définira le flux à travers une petite portion de surface s telle que l'induction soit pratiquement uniforme dans toute son étendue :

$$\varphi = B.s.\cos\theta.$$

La *somme algébrique* de tous ces flux définira le flux Φ à travers S.



148. Flux d'induction magnétique à travers une surface quelconque.

■ **163. Théorème de Maxwell.** — Faisons intervenir dans l'expression du travail des forces électromagnétiques le flux d'induction à travers la surface balayée. La formule $\Delta W = I.B.\Delta S.\cos\theta$, dans laquelle $B.\Delta S.\cos\theta = \Delta\Phi$, s'écrit alors simplement :

$$\Delta W = I.\Delta\Phi.$$

On remarque sur la *figure 145* que le flux d'induction à travers la portion de circuit limitée aux rails est positif et que le travail de la force F, est positif lorsque ce flux augmente. On peut donc écrire *algébriquement* :

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$$

Φ_1, étant le flux d'induction à travers le circuit quand la barre est en CD, et Φ_2 le flux d'induction à travers le circuit lorsque la barre est venue en C′D′. On en déduit le *théorème de Maxwell* :

▶ ***Théorème.*** *La valeur du travail des forces électromagnétiques au cours du déplacement d'un circuit dans un champ d'induction est égale au produit de la mesure de l'intensité du courant par la valeur de l'accroissement du flux d'induction à travers le circuit.*

W	=	I	.$(\Phi_2 - \Phi_1)$
joule		ampère	Weber

Ce théorème, établi dans un cas particulier, est tout à fait général et s'applique à un circuit quelconque.

● EXEMPLE. — *Une spire circulaire de 5 cm de rayon, parcourue par un courant de 30 ampères est dans le plan du méridien magnétique. On la fait tourner de façon qu'elle devienne perpendiculaire à ce plan. Calculer le travail des forces électromagnétiques au cours de ce déplacement. Composante horizontale de l'induction terrestre : 0,2 gauss.*

Ce travail nous est donné par théorème de Maxwell :

$$W = I.(\Phi_2 - \Phi_1).$$

Le flux initial Φ_1 est nul (B dans le plan du circuit) :

$$\Phi_1 = 0.$$

Le flux final a pour valeur absolue : $|\Phi_2| = S.B$

$$|\Phi_2| = \pi \times (0{,}05)^2 \times 2 \times 10^{-5} = 5\pi \times 10^{-8}\,\text{Wb}.$$

Φ_2 est positif si l'induction terrestre entre par la face sud. Prenons ce cas :

$$W = 30 \times 5\pi \times 10^{-8} = 4{,}7.10^{-6}\,\text{joule}.$$

Le travail des forces électromagnétiques est alors positif, c'est-à-dire que

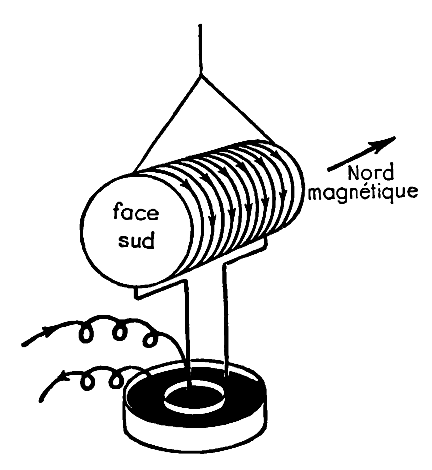
sous l'action de ces seules forces, le circuit tend à se placer ainsi (flux entrant par la face sud).

Si on tournait le circuit en sens contraire, W serait négatif : il faudrait dépenser du travail.

■ 164. Conséquence du théorème de Maxwell : règle du flux maximum. — Lorsqu'un circuit parcouru par un courant se déplace librement sous l'action d'une induction magnétique, le travail des forces électromagnétiques est nécessairement positif : $W > 0$; donc $\Phi_2 - \Phi_1 > 0$, ou encore : $\Phi_2 > \Phi_1$. Le sens du *déplacement spontané* du circuit est tel que le flux qui le traverse augmente, d'où la règle du flux maximum ou règle de Maxwell.

▶ ***Règle du flux maximum.*** *Lorsqu'un circuit parcouru par un courant se déplace sous l'action d'une induction magnétique, le flux entrant par sa face sud augmente. La position d'équilibre est atteinte lorsque ce flux est maximum.*

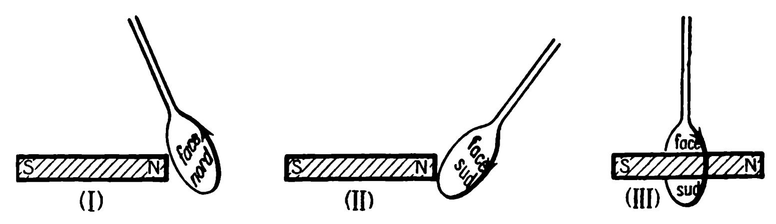
■ 165. Vérifications expérimentales. — Prenons un circuit plan ou mieux un solénoïde (*fig. 149*) parcouru par un courant et placé dans un champ d'induction uniforme, comme le champ terrestre. Le solénoïde, suspendu par un fil de torsion négligeable, s'oriente de façon que son axe soit parallèle au méridien magnétique, sa face nord étant dirigée vers le nord magnétique. A ce moment chacune des spires, normale à la composante horizontale de l'induction terrestre, est traversée par le flux maximum puisqu'il entre normalement par la face sud de ces spires. On remarquera d'ailleurs que le solénoïde se comporte comme un barreau aimanté droit.



149. Orientation d'un solénoïde dans le champ terrestre.

La règle de Maxwell s'applique même si l'induction n'est pas uniforme, comme le montre l'expérience suivante. Suspendons une bobine légère formée de quelques spires de fil fin par deux fils métalliques très fins qui serviront au passage du courant et plaçons devant cette bobine un pôle d'un barreau aimanté droit (*fig. 150*). Lorsque l'on fait passer le courant, on constate, selon le sens de ce courant, soit une répulsion soit une attraction. Dans le cas d'une répulsion, il arrive presque toujours que la bobine finit par se retourner et est alors attirée; elle s'enfile sur l'aimant pour venir dans la région médiane.

Supposons que le courant passe dans le sens 1 (*fig. 150 I*), la bobine se comporte comme un aimant plat *dont la face nord est vers le pôle nord de l'aimant : il y a répulsion.*

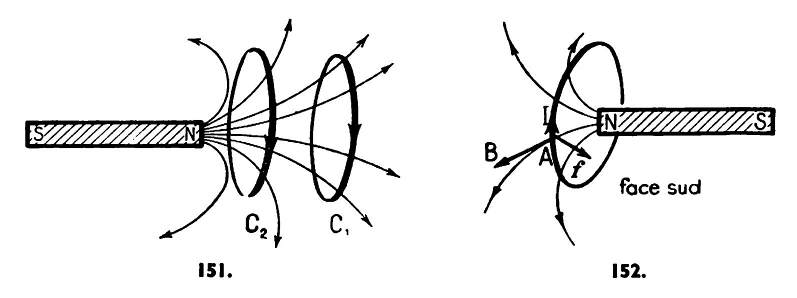


150. Action d'une induction non uniforme sur une spire.

Si on inverse le sens du courant, sens 2 (*fig. 150 II*) ; la bobine présente *une face sud au pôle nord de l'aimant : il y a attraction.*

Enfin la bobine est en équilibre lorsque, entourant l'aimant l'axe SN de cet aimant la traverse en entrant par sa face sud (*fig. 150 III*).

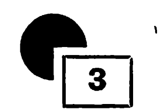
Prenons une spire C_1 (*fig. 151*) présentant sa face sud au pôle nord de l'aimant SN : il y a attraction. Or nous voyons que dans la position C_2, le nombre de lignes de force pénétrant par la face sud de la spire a augmenté, ce qui revient à dire que *le flux pénétrant par cette face sud*



151. **152.**

a augmenté. C_2 étant plus près que C_1 le champ magnétique en chacun de ses points y est plus intense.

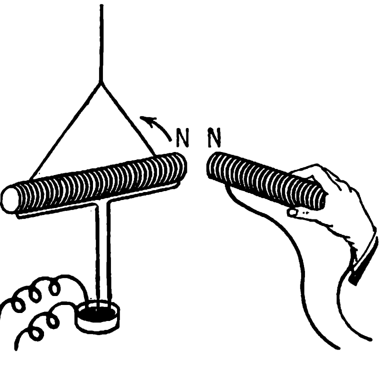
La figure 152 montre l'application de la loi de Laplace à une portion de bobine voisine de A : la règle des trois doigts donne bien une force en A dirigée vers l'aimant. Mais il est plus simple de raisonner en assimilant la bobine à un aimant.



ACTION D'UN COURANT SUR UN COURANT

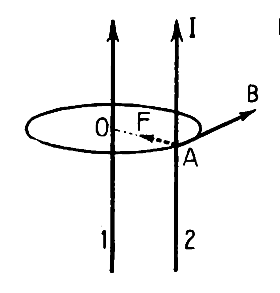
■ **166. Action mutuelle de deux bobines.** — L'induction magnétique agissant sur une bobine peut provenir d'une autre bobine. Il n'y a plus de milieu aimanté. L'expérience de la *figure 153* montre que les faces de même nom de deux bobines se repoussent tandis que les faces de noms contraires s'attirent.

■ 167. Action mutuelle de deux courants parallèles. — Soient deux fils parallèles indéfinis (*fig. 154*) parcourus par des courants de même sens. Le fil 1 crée en un point A du fil 2 une induction B. Une portion de courant de ce fil 2, sous l'action de cette induction B est soumise à une force F normale au fil 2 et au vecteur B, donc dirigée vers le fil 1. L'application de la règle des 3 doigts donne bien comme sens le sens de A vers O. La force F est donc une force d'attraction.



153. Action mutuelle de deux bobines.

▶ *Deux courants parallèles et de même sens s'attirent; deux courants parallèles et de sens contraires se repoussent.*



154.

■ 168. Définition légale de l'ampère. — Extrait de la convention internationale de 1948.

▶ *L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable, et placés à une distance de un mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force attractive égale à 2.10^{-7} newton par mètre de longueur.*

Vérifions que cette définition s'accorde bien avec les coefficients numériques donnés à propos de la formule de Laplace et de l'expression de l'induction du courant rectiligne.

L'induction créée par un courant rectiligne indéfini en un point A (*fig. 152*) distant de 1 mètre est, si $I = 1$ ampère, a pour valeur :

$$B = \frac{2}{10^7} \cdot \frac{I}{d} = \frac{2}{10^7} \text{ tesla.}$$

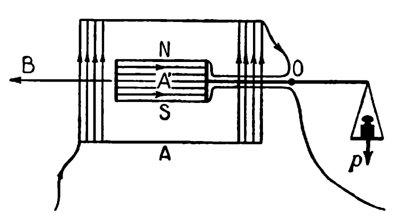
Une longueur l de 1 mètre de fil subit alors une force :

$$F = I.l.B = 1 \times 1 \times \frac{2}{10^7} = \frac{2}{10^7} \text{ newton.}$$

C'est bien la définition de l'ampère.

On utilise, pour la graduation des ampèremètres, des appareils appelés ***ampères-étalons*** dont la *figure 155* donne un schéma. Une bobine A parcourue par le courant I à mesurer, crée une induction magnétique proportionnelle à I qui exerce sur la bobine A′ placée en série avec A un couple. Ce couple est ainsi proportionnel à I^2. La bobine

A′ est solidaire d'un fléau de balance; l'équilibre de la balance est détruit lorsque le courant passe et on le rétablit au moyen d'une surcharge p. L'appareil ainsi réalisé permet de mesurer une intensité de l'ordre de 1 ampère avec une erreur relative de $\frac{1}{10\,000}$. La précision obtenue est plus grande qu'en faisant appel au phénomène d'électrolyse, ce qui explique l'abandon de l'étalon électrolytique.



155. Schéma d'un ampère étalon.

¶ **Remarque :** Les applications les plus importantes de l'action d'une induction magnétique sur un circuit parcouru par un courant sont, sans aucun doute, les moteurs électriques. Dans un tel moteur, des barres conductrices parcourues par un courant sont soumises à une induction magnétique et l'ensemble des forces électromagnétiques forme un couple qui fait tourner le circuit mobile autour d'un axe.

L'*énergie mécanique* cédée par le moteur au cours du mouvement de rotation a son origine dans le *travail des forces électromagnétiques* que nous venons d'étudier. Le courant électrique apparaît ainsi comme *un moyen de transport d'énergie* depuis le générateur jusqu'au moteur.

◀ RÉSUMÉ ▶

Un circuit parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à des forces, dites ***forces électromagnétiques.***

La force électromagnétique qui s'exerce sur une portion de circuit est donnée par la ***Loi de Laplace*** *:*

Une portion de conducteur de longueur l, parcourue par un courant d'intensité I, soumise à une induction magnétique B qui fait un angle α avec le conducteur, subit une force perpendiculaire au plan défini par le courant et l'induction, dirigée vers la gauche d'un observateur d'Ampère qui regarde dans le sens de B et dont l'intensité est donnée par la relation :

$$f = \mathrm{I}.l.\mathrm{B}\sin\alpha.$$

Au cours du déplacement d'un circuit sous l'action des forces électromagnétiques, le ***travail*** *effectué par ces forces a pour expression :*

$$\Delta \mathrm{W} = \mathrm{I}.\mathrm{B}.\Delta \mathrm{S}\cos\theta.$$

ΔS étant la surface balayée par le conducteur au cours du déplacement, θ l'angle du vecteur $\vec{\mathrm{B}}$ avec la normale à la surface ΔS.

On appelle ***flux d'induction*** *magnétique $\Delta\Phi$ à travers un élément de surface ΔS le produit de ΔS par la projection du vecteur induction sur la normale à ΔS :*

$$\Delta\Phi = \mathrm{B}.\Delta \mathrm{S}.\cos\theta.$$

L'unité de flux d'induction est le ***weber;*** *on utilise aussi le* ***maxwell*** *qui correspond à* 10^{-8} *weber. Le flux d'induction à travers un circuit est compté positivement si le vecteur B entre par la face sud du circuit.*

L'expression du travail des forces électromagnétiques est alors donnée par le ***théorème de Maxwell :***

$$\Delta W = I.\Delta\Phi \quad \text{ou} \quad \Delta W = I.(\Phi_2 - \Phi_1).$$

$\Delta\Phi$ *étant le flux à travers la surface balayée par le conducteur au cours du déplacement;* Φ_2 *et* Φ_1 *étant les flux entrant par la face sud du circuit dans les positions initiale et finale du circuit.*

Lorsqu'un circuit fermé se déplace dans un champ magnétique sous l'action des forces électromagnétiques, ***le flux entrant par la face sud du circuit augmente.*** *Il est en équilibre* ***si ce flux est maximum.***

Un courant agit sur un autre courant par l'induction magnétique qu'il crée; deux courants rectilignes parallèles et de même sens s'attirent. La définition légale de l'ampère est basée sur ce phénomène d'attraction : deux courants parallèles indéfinis situés à un mètre de distance exercent l'un sur l'autre une force attractive égale à 2.10^{-7} *newton par mètre de longueur, lorsqu'ils sont parcourus par un courant de 1 ampère.*

★ EXERCICES ★

144. — Un fil vertical traverse l'entrefer d'un électro-aimant, et une longueur de 5 cm de fil est soumise à une induction de 0,1 **tesla.** A quelle force est soumise cette portion de fil parcourue par un courant de 20 ampères? — **Rép. :** *0,1 newton.*

145 — Un fil vertical de 2 m est parcouru par un courant de 50 ampères; à quelle force est-il soumis du fait du champ terrestre? Composante horizontale du champ terrestre : 0,2 gauss.

146. — Un fil horizontal, perpendiculaire au méridien magnétique, est traversé par un courant de 20 ampères. Quelle est la force électromagnétique qui agit sur lui par mètre de longueur? Que deviendrait cette force si le fil horizontal étant dans le plan du méridien magnétique? Composante horizontale de l'induction terrestre : 0,2 gauss. Inclinaison : + 60°. — **Rép. :** 8.10^{-4} *newton;* $6{,}93.10^{-4}$ *newton.*

147 — Une balance de Cotton est telle que les poids placés dans le plateau soient égaux à la force électromagnétique. La partie utile du courant mobile a 1 cm de long, et ne peut supporter plus de 5 ampères. La balance est sensible au centigramme. Avec quelle précision peut-on mesurer les inductions?

148 — Une roue de Barlow de 8 cm de rayon a sa moitié inférieure plongée dans un champ de 500 gauss, perpendiculaire à son plan; le courant est de 20 ampères. Calculer la valeur du poids à placer à l'extrémité d'un rayon horizontal de la roue pour l'empêcher de tourner? — **Rép. :** *0,04 newton.*

149 — La roue précédente fait deux tours par seconde. Calculer la puissance en watts et en chevaux-vapeur du petit moteur ainsi réalisé.

150. — Un cadre rectangulaire parcouru par un courant situé dans le plan du méridien magnétique est soumis à l'induction magnétique terrestre. Les côtés AA' = CC' sont horizontaux; leur longueur est 10 cm. Les côtés AC, A'C' sont verticaux; leur longueur est 20 cm. Figurer les forces exercées sur les quatre côtés du cadre et calculer leur intensité si I = 10 A. Composante horizontale de l'induction terrestre : 2.10^{-5} tesla; angle d'inclinaison : 60°.

151. — Calculer le travail des forces électromagnétiques appliquées au cadre rectangulaire de l'exercice *150* lorsqu'il passe de la position considérée à la position d'équilibre normale à l'induction terrestre. — **Rép. :** $W = 8 \times 10^{-6}$ *J.*

152. — Une spire de 10 cm de rayon est placée dans un champ magnétique dont l'induction uniforme a pour valeur 4.10^{-4} tesla; calculer le flux maximum. Pour quel angle θ de la normale au circuit avec l'induction, le flux est-il égal à la moitié du flux maximum?

CHAPITRE XVIII

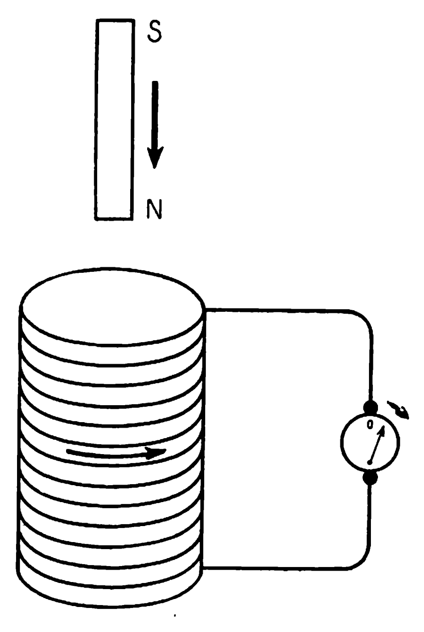
INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

1. Étude qualitative.
2. Loi quantitative.



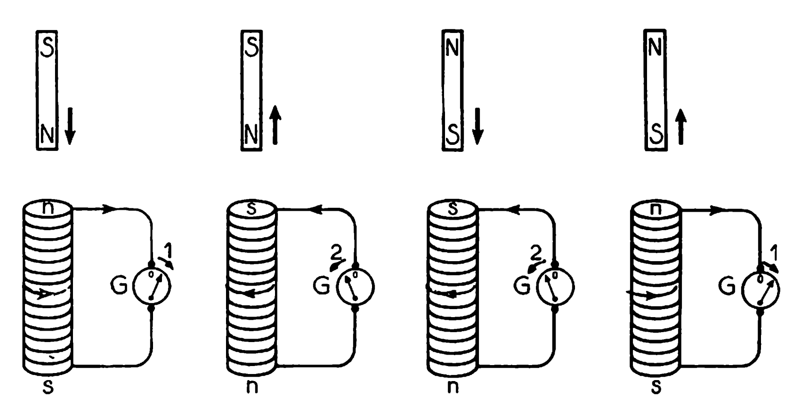
ÉTUDE QUALITATIVE

■ **169. Expérience fondamentale.** — Relions les deux extrémités d'un solénoïde à un galvanomètre : nous réalisons ainsi un circuit fermé ne comprenant pas de générateur et le galvanomètre reste au zéro (*fig. 156*). Approchons du solénoïde un aimant droit : *pendant le déplacement de l'aimant*, le galvanomètre dévie, décelant ainsi le passage d'un courant, et revient au zéro lorsque l'aimant est immobile. Ce phénomène *extraordinaire*, production d'un courant dans un circuit ne comprenant aucun générateur, par déplacement d'un aimant dans son voisinage, est appelé le phénomène d'***induction électromagnétique.*** Il a été découvert en 1839 par le physicien anglais *Michaël Faraday* (1791-1867). Le solénoïde précédent joue le rôle d'un générateur. En permettant la réalisation des générateurs industriels, dynamos et alternateurs, cette découverte a été à l'origine du prodigieux essor de l'industrie électrique.



156. Expérience fondamentale.

■ **170. Étude expérimentale.** — 1° Si nous analysons l'expérience précédente nous constatons qu'en approchant ou en éloignant l'aimant du solénoïde, nous augmentons ou diminuons l'induction magnétique créée par l'aimant en un point intérieur au solénoïde. Un courant induit peut donc être produit par ***variation de l'intensité de l'induction magnétique*** au voisinage d'un conducteur.

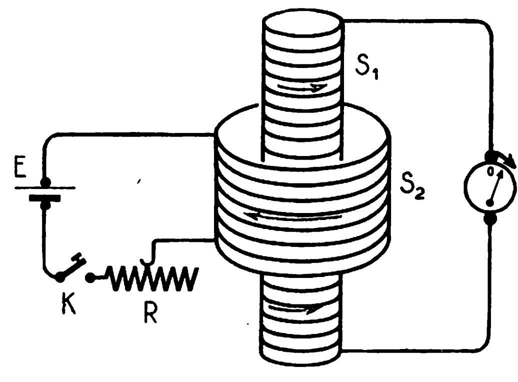


157. Variations du **sens du courant induit** selon le mouvement de l'aimant.

Les expériences de la *figure 157* montrent que le sens du courant induit change avec le sens du mouvement de l'aimant et avec la nature du pôle (nord ou sud) approché; ce sens dépend donc de l'augmentation ou de la diminution de l'induction B produite à l'intérieur du solénoïde et de la direction de cette induction. On notera que le courant induit crée aux extrémités du solénoïde deux faces nord et sud *n*, s et que la disposition de ces faces est telle que, dans chaque expérience, la force située du côté de l'aimant tend à repousser cet aimant s'il s'approche, ou à l'attirer s'il s'éloigne.

▶ *Les effets électromagnétiques du courant induit tendent à contrarier le mouvement de l'aimant.*

La variation de l'induction magnétique peut être produite par un autre solénoïde que l'on déplace comme l'aimant précédent, ou encore par un deuxième solénoïde fixe parcouru par un courant variable et entourant le premier *fig. 158*. Si on ferme l'interrupteur K, le

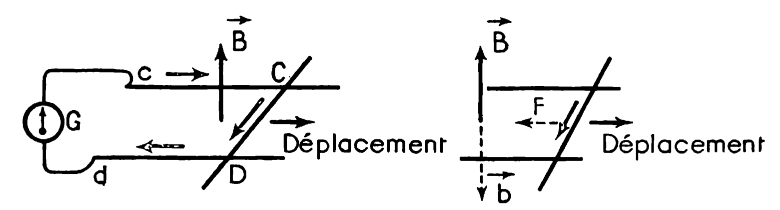


158. Induction par champ variable.

galvanomètre dévie et puis revient au zéro. Un courant induit s'est produit au moment de l'établissement du champ magnétique; la *figure 158* indique le sens du courant fourni par le générateur E dans le solénoïde S_2, ainsi que le sens du courant induit dans le solénoïde S_1 au moment de la fermeture de l'interrupteur K. Lorsque l'on coupe le courant en ouvrant l'interrupteur K, une nouvelle déviation du galvanomètre se produit, mais en sens inverse du sens précédent.

On constate donc que le sens du courant induit est tel que l'induction qu'il crée en un point du solénoïde S_1 s'oppose à la ***variation de l'induction*** qui provoque le phénomène, induction due ici au courant qui traverse S_2. Si celle-ci augmente (fermeture de K), l'induction produite par S_1 lui est opposée; si elle diminue (ouverture de K), l'induction produite par S_1 est de même sens. On vérifie ce même résultat en faisant varier l'induction créée par le solénoïde S_2 par manœuvre du rhéostat R.

► *Un courant induit peut être produit par variation d'induction magnétique à travers un circuit; il est de sens tel que l'induction qu'il crée lui-même s'oppose à la variation de l'induction produisant le phénomène.*



159. Production d'un courant induit par déplacement d'un conducteur dans une induction fixe.

2. Relions les bornes d'un galvanomètre aux deux extrémités *cd* de deux rails horizontaux (*fig. 159*), entre lesquels un aimant en fer à cheval (non figuré) crée une induction verticale constante B. Fermons le circuit par une barre CD : le galvanomètre est au zéro. Déplaçons rapidement la barre CD vers la droite; le galvanomètre dévie pendant la durée du déplacement, décelant l'existence d'un courant induit. Cependant l'induction B est restée constante en chaque point. La seule grandeur qui ait varié est la surface S du rectangle *c*CD*d* traversé par cette induction et par conséquent le ***flux Φ à travers cette surface*** ($\Phi = B.S$) a changé.

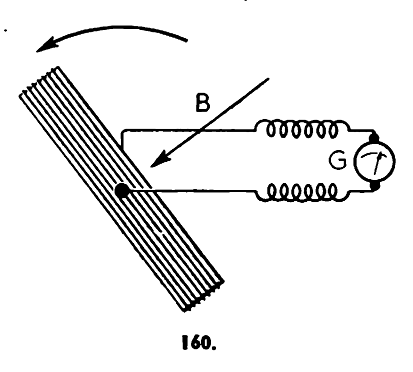
Cette expérience fort importante nous conduit à penser que le *courant induit est dû à une variation du flux d'induction à travers le circuit* : cette hypothèse nous permet tout aussi bien d'interpréter la première expérience fondamentale dans laquelle la surface S était constante, et B variable.

La *figure 159* précise d'ailleurs le sens du courant observé : si S augmente, **Φ** augmente et l'induction due au courant induit, soit $\vec{b}$, est de sens contraire à $\vec{B}$ créant ainsi un flux qui s'oppose à l'augmentation de **Φ**.

▶ *Un courant induit est toujours dû à une variation de flux d'induction à travers le circuit; il est de sens tel que le flux d'induction qu'il crée lui-même s'oppose à la variation du flux produisant le phénomène.*

¶ **Remarque :** La *figure 159* montre que l'induction B exerce sur le courant induit une force électromagnétique F dont la direction, donnée par la loi de Laplace, est *opposée au déplacement.*

Si notre hypothèse est correcte : la production d'un courant induit est due à une variation de flux, nous devons observer ce phénomène en faisant varier le flux par rotation d'un circuit dans un champ d'induction constant, comme le champ terrestre. Prenons une bobine plate de grande surface, comportant un grand nombre de spires et mobile autour d'un axe horizontal. L'axe de rotation étant normal au méridien magnétique (*fig. 160*), disposons le plan de la bobine plate perpendiculairement à l'induction terrestre qui fait avec le plan horizontal un angle d'environ 60° (inclinaison), et relions les deux extrémités du circuit à un galvanomètre. Par retournement brusque de cette bobine, on observe une déviation du galvanomètre : l'angle θ de la normale au plan du circuit avec θ a varié brusquement de zéro à π, et le flux magnétique de sa valeur initiale Φ_0 à $-\Phi_0$.



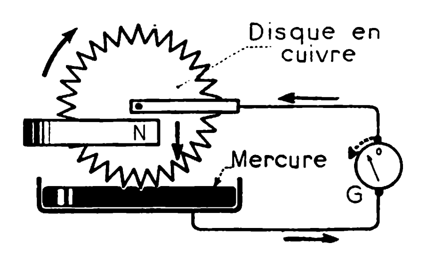
160.

¶ **Remarque :** Si dans l'une des expériences précédentes le circuit est ouvert, on n'observe évidemment pas de courant induit, mais on peut cependant montrer qu'il se produit dans le solénoïde ou dans la barre CD *une force électromotrice* qui se traduit par l'existence d'une *différence de potentiel* entre les extrémités du solénoïde ou de la barre mobile CD.

L'analyse expérimentale précédente nous permet de préciser la définition des phénomènes d'induction électromagnétique.

▶ ***Définition.*** *On désigne sous le nom de phénomènes d'induction électromagnétique la production d'un courant électrique dans un circuit fermé, ou d'une force électromotrice dans un circuit ouvert, par variation du flux d'induction magnétique traversant le circuit. Le courant ainsi obtenu est appelé un courant induit.*

■ **171. Production d'un courant induit par la roue de Barlow. —** Relions les deux bornes d'un galvanomètre à une roue de Barlow (*fig. 161*). Lançons la roue à la main avec une grande vitesse de rotation : le galvanomètre dévie, décelant un courant induit. Cependant, il n'y a pas eu de variation du flux d'induction à travers le circuit comprenant la roue et le galvanomètre : B,S,θ sont restés constants!



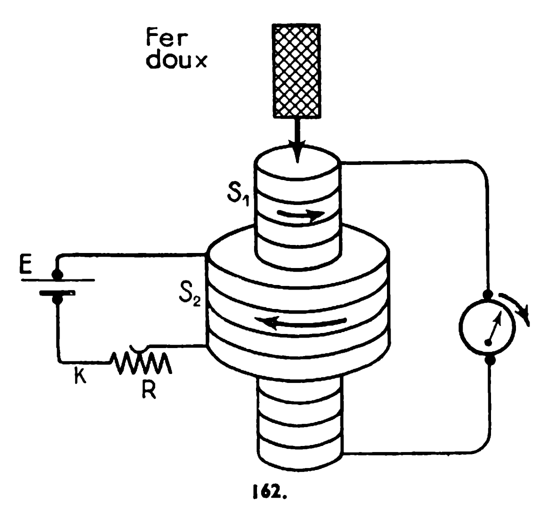
161. Roue de **Barlow** (production d'un **courant induit**).

Chaque rayon de la roue a coupé les lignes de force du champ et, de ce fait, a été le siège d'un courant induit.

▶ *Lorsqu'une portion de conducteur coupe les lignes de force d'un champ d'induction magnétique, il s'y développe une force électromotrice induite.*

Remarquons que dans l'expérience du paragraphe précédent où on déplaçait la barre CD, cette barre coupait les lignes de force du champ d'induction B; on peut donc en donner la même interprétation que pour la roue de Barlow.

■ **172. Influence du milieu. Notion de perméabilité.** — Les expériences précédentes ont été réalisées dans l'air, et le flux d'induction mis en cause était le flux d'induction dans l'air (ou dans le vide). On peut se demander comment seraient modifiés les phénomènes précédents si dans le solénoïde S_1 de l'expérience relatée par la *figure 158*, on introduisait un milieu magnétique tel que le fer doux, l'acier, etc....



162.

Reprenons donc l'expérience de la *figure 156*; l'interrupteur K étant fermé, le galvanomètre G au zéro, introduisons (*fig. 162*) un barreau de fer doux, non aimanté, dans le solénoïde S_1 : nous constatons une *déviation énorme* de G et nous vérifions que le sens du courant induit ainsi obtenu correspond à un accroissement considérable du flux d'induction à travers S_1. La surface et l'orientation du solénoïde n'ayant pas changé, cette augmentation de flux ne peut être attribuée qu'à une augmentation de l'induction B. Le solénoïde S_2 parcouru par un courant crée dans le fer doux une induction plus grande que dans l'air (ou dans le vide) : on dit que le fer doux *est plus perméable* que l'air ou le vide.

En remplaçant le barreau de fer doux par d'autres barreaux, on constate que l'augmentation de B n'est sensible qu'avec quelques

substances appelées des *substances ferromagnétiques* : fer doux, acier, nickel, cobalt, la magnétite Fe_3O_4 et certains alliages de manganèse. Ce sont d'ailleurs des substances qui peuvent devenir des aimants.

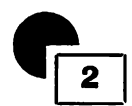
On peut définir correctement la *perméabilité relative* d'un milieu en imaginant un solénoïde infiniment long parcouru par un courant. Dans le vide, à l'intérieur du solénoïde existe une induction : $B_0 = \frac{4\pi}{10^7} n_1 I$ (n_1 nombre de spires par mètre de longueur). Si le solénoïde est rempli de fer doux, l'induction devient B. Le rapport $\mu_r = \frac{B}{B_0}$ est alors égal à la *perméabilité relative* du fer par rapport au vide. C'est un nombre, indépendant des unités, qui varie d'ailleurs avec B. μ_r peut atteindre 15 000 avec du fer doux et même 100 000 avec du fer très pur.

■ **173. Loi qualitative. Loi de Lenz.** — Les résultats précédents se résument par les deux lois suivantes :

▶ *Tout circuit traversé par un flux d'induction magnétique variable est le siège d'une force électromotrice. S'il est fermé, il est parcouru par un courant induit. Tout conducteur en mouvement dans un champ magnétique est le siège d'une force électromotrice induite.*

Le sens du courant induit est donné par la ***loi de Lenz.***

▶ *Le sens du courant induit est tel que, par ses effets électromagnétiques, il s'oppose à la cause qui lui a donné naissance. Si le courant induit est dû à un déplacement, le courant s'oppose à ce déplacement. Si le courant est dû à une variation de flux, le flux produit par le courant induit s'oppose à la* ***variation*** *du flux inducteur.*



ÉTUDE QUANTITATIVE

■ **174. Valeur de la force électromotrice d'induction.** — Les expériences des *figures 157 et 158* permettent de vérifier facilement que la force électromotrice induite *pendant un temps donné* augmente avec la variation de flux $\Delta\Phi$ dans le solénoïde S_1. La déviation du galvanomètre G est plus grande lorsque l'intensité du courant qui passe dans le solénoïde S_2 est plus forte.

Pour une même variation de flux $\Delta\Phi$, la force électromotrice est d'autant plus grande que la durée Δt de cette variation est plus faible : on le vérifie en modifiant la vitesse de déplacement de l'aimant lors de la première expérience, ou en déplaçant plus ou moins rapidement le curseur du rhéostat de l'expérience dans la *figure 158*.

Nous admettrons la loi suivante :

▶ *La force électromotrice d'induction* E *est proportionnelle à la variation de flux et inversement proportionnelle à la durée de cette variation.*

$$E = k.\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

où k est un coefficient qui dépend des unités choisies.

Il résulte de la loi de Lenz que k est négatif, le flux induit devant être opposé à la *variation* $\Delta\Phi$. Si on exprime E en volts, $\Delta\Phi$ en webers et Δt en secondes, le coefficient k est, en valeur absolue, égal à l'unité; d'où la formule fondamentale :

$$\underset{\text{volt}}{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\ \frac{\text{weber}}{\text{seconde}}$$

¶ **Remarque :** $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ représente la valeur moyenne de la variation de flux par unité de temps : c'est la vitesse moyenne de variation de flux. A un instant donné, $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ a comme valeur limite la dérivée de $\frac{d\Phi}{dt}$ la valeur du flux en fonction du temps. On peut être amené à utiliser cette expression dans certains problèmes, où l'on a besoin de connaître la valeur exacte de la fonction E au temps t.

■ **175. Intensité du courant induit. Quantité d'électricité induite.** — Si le circuit fermé a comme résistance totale R, l'intensité du courant induit est $i = \frac{E}{R} = -\frac{1}{R}\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

On a ainsi *une valeur moyenne* de l'intensité du courant induit qui a passé pendant Δt secondes.

Pendant la durée Δt du phénomène d'induction, le circuit a été traversé par une quantité d'électricité Δq telle que :

$$\Delta q = i\Delta t$$

$$\underset{\text{coulomb}}{\Delta q} = -\frac{\Delta\Phi}{R}\ \frac{\text{weber}}{\text{ohm}}$$

On voit que Δq est indépendant de la durée du phénomène.

¶ **Remarque** : Si $\frac{d\Phi}{dt}$ est la dérivée de la valeur du flux en fonction du temps, i représentera l'intensité du courant induit au temps t.

■ **176. Cas d'un circuit ouvert.** — Dans les expériences précédentes, si le circuit reste ouvert, le courant induit ne peut pas passer, mais *il y a toujours création d'une f. e. m. d'induction* donnée par la formule fondamentale. Comme pour un générateur en circuit ouvert, il s'établit entre les deux extrémités du circuit une différence de potentiel égale à la f. e. m. d'induction.

● EXEMPLE. — *Une barre métallique CD de 1 m de longueur, est déplacée horizontalement avec une vitesse de 30 mètres par seconde. Calculer la différence de potentiel entre ses extrémités C et D sachant que la composante horizontale de l'induction terrestre vaut 0,2 gauss et que l'inclinaison magnétique est égale à 60°.*

Pendant un temps $\Delta t = 1$ **sec**, la barre a balayé une surface

$$\Delta S = 1 \times 30 = 30 \text{ m}^2.$$

Le flux $\Delta \Phi$ à travers cette surface est :

$$\Delta \Phi = \Delta S . B_v$$

si Bv est la composante verticale de l'induction terrestre.

Or $\quad B_v = B_h \times \text{tg}\, i \quad$ Bh, composante horizontale; *i*, inclinaison.

$B_v = 0{,}2 \times \text{tg } 60^\circ = 0{,}2 \times \sqrt{3} = 0{,}346$ gauss soit 346×10^{-7} **tesla.**

On aura donc : $\quad \Delta \Phi = 30 \times 346 \times 10^{-7}$ Wb.

et la f. e. m. induite E a pour valeur :

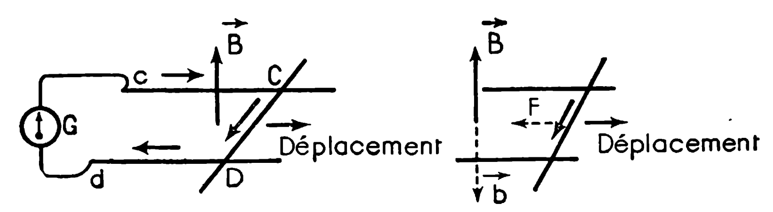
$$E = -\frac{\nabla \Phi}{\Delta t} = -30 \times 346 \times 10^{-7} \text{ volt}$$

$$E = -1\,038 \times 10^{-6} \text{ volt ou } 1{,}038 \text{ mV}.$$

C'est la différence de potentiel entre C et D.

$$|V_C - V_D| = 1{,}038 \text{ mV}.$$

■ **177. Énergie mise en jeu dans les phénomènes d'induction : cas particulier d'un circuit mobile dans un champ d'induction constante.** — Nous avons étudié les lois de l'induction électromagnétique sans nous préoccuper de l'énergie développée par le courant induit. Plaçons-nous dans un cas très simple. Reprenons le circuit de



163. La force F s'oppose au déplacement.

la *figure 159* : le galvanomètre G est relié aux rails *c*C et *d*D. Lorsqu'on déplace la barre CD vers la droite, il se produit un courant induit qui, sous l'action de l'induction B, est soumis à une force F opposée au déplacement (*fig. 163*). Il faut donc, pour déplacer la barre CD, exercer sur cette barre une force motrice égale et opposée à F et ***effectuer** ainsi un travail* égal et opposé au travail de la force électromagnétique. Or celui-ci nous est donné par le *théorème de Maxwell* (§ *163*).

$$\Delta W = I . \Delta \Phi$$

▶ *Pour créer un courant induit, il faut dépenser du travail.*

La barre CD est devenue un générateur, de f. e. m. $E = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$; ce générateur, débitant le courant I pendant le temps Δt, a fourni l'énergie :

$$\Delta W' = E . I . \Delta t = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} . I . \Delta t$$

$$\Delta W' = -I . \Delta \Phi.$$

On voit que, pendant le temps Δt, l'opérateur a fourni d'une part un travail opposé à ΔW, donc égal à $-I\Delta\Phi$ et que d'autre part le courant induit a dépensé exactement ce même travail.

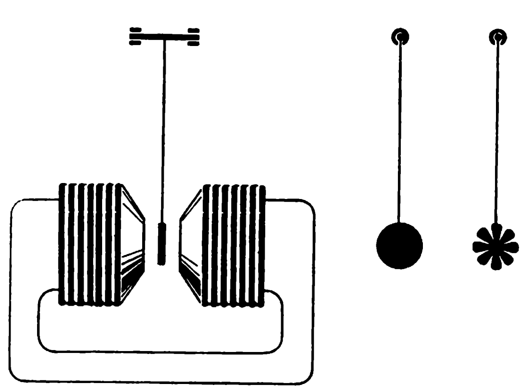
▶ *Lorsque l'on produit un courant induit par déplacement d'un circuit dans un champ magnétique, l'énergie électrique qui apparaît dans le circuit est égale au travail qu'il faut dépenser pour produire le déplacement.*

Un tel système est appelé un générateur de courant induit; c'est le cas des dynamos, des magnétos, des alternateurs.

• **Remarque :** Dans le cas où les courants induits dans un circuit fixe sont dus à la variation du champ magnétique produit par un autre circuit fixe, l'énergie mise en jeu est encore d'origine électromagnétique, mais son expression est plus compliquée. C'est finalement le générateur du circuit inducteur qui fournit cette énergie.

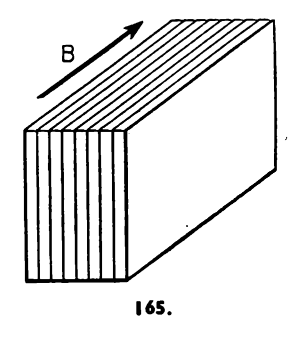
Prenons maintenant le cas d'un *moteur*, par exemple la roue de Barlow du § *154*. Lorsqu'elle se met à tourner par suite de l'action de l'induction magnétique sur le courant qui circule dans la roue, elle coupe des lignes de force et il se produit (§ *167*) un phénomène d'induction. La f. e. m. induite dans la roue s'oppose au passage du courant : elle est donc en réalité une *force contre-électromotrice*. Le travail fourni par le moteur est égal au travail des forces électromagnétiques donné par le théorème de Maxwell.

■ **178. Courants de Foucault.** — Si, au lieu de déplacer un circuit filiforme dans un champ magnétique, on déplace une masse métallique, il apparaît dans cette masse conductrice des courants induits appelés des *courants de Foucault*. Ces courants se produisent également lorsqu'un conducteur fixe est soumis à un champ variable.



164. Courants de Foucault.

Ces courants suivent la loi de Lenz : en particulier, s'ils sont dus à un déplacement, ils freinent ce déplacement. Ce phénomène est facilement mis en évidence en faisant osciller un pendule dans le champ magnétique produit par un électro-aimant. Le pendule, écarté de sa position d'équilibre, est rapidement freiné et revient à cette position sans osciller si le champ magnétique est suffisamment grand (*fig. 164*). En découpant le disque constituant le pendule, on empêche les courants de Foucault de circuler dans la totalité du disque et on diminue beaucoup leur intensité : le pendule oscille avant de s'arrêter.



165.

Les courants de Foucault échauffent la masse conductrice par effet Joule : ils constituent dans les dynamos, les moteurs une perte d'énergie; on les atténue en *feuilletant* les masses métalliques parallèlement au champ. Les tôles ainsi obtenues (*fig. 165*) sont séparées par une très mince couche de vernis isolant. On montre facilement cet échauffement en plaçant dans une bobine parcourue par un courant alternatif un noyau de fer non feuilleté; il devient rapidement brûlant; un noyau de fer feuilleté ne s'échauffe presque pas. On utilise cet échauffement par les courants de Foucault dans les *fours à induction*, en provoquant ces courants dans la matière à fondre : on place celle-ci dans un champ d'induction magnétique intense très rapidement variable.

◀ *RÉSUMÉ* ▶

On désigne sous le nom de phénomène d'induction électromagnétique ***la production d'une force électromotrice*** *dans un circuit par* ***variation du flux d'induction traversant le circuit*** *et, si le circuit est fermé, d'un* ***courant électrique.*** *Le courant ainsi obtenu est appelé un* ***courant induit.***

On peut obtenir des courants induits par variation de l'induction magnétique, de la surface du circuit, de son orientation.

On observe la formation de courants induits lorsque l'on introduit un barreau de fer doux dans un solénoïde où existe une induction magnétique : à l'intérieur du fer doux l'induction magnétique est plus grande que dans le vide. Le fer doux est plus ***perméable*** *que le vide.*

Le sens du courant induit est donné par la ***loi de Lenz;*** *le courant induit est de sens tel que, par ses effets électromagnétiques, il s'oppose à la cause qui lui a donné naissance.*

La force électromotrice d'induction E *est* ***proportionnelle à la variation de flux*** *et* ***inversement proportionnelle à la durée*** *de cette variation :*

$$\underset{\text{volt}}{\mathbf{E}} = -\frac{\Delta\Phi \ \text{Weber}}{\Delta t \ \text{seconde}}$$

*Lorsque l'on produit un courant induit par déplacement d'un circuit dans un champ magnétique, l'**énergie électrique** qui apparaît dans le circuit* ***est égale au travail*** *qu'il faut dépenser pour produire le déplacement.*

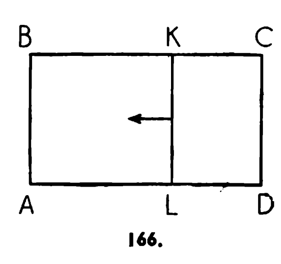
Dans la masse d'un conducteur en mouvement dans un champ magnétique ou traversé par un champ variable, il se produit des courants induits appelés ***courants de Foucault.*** *Ils ralentissent le mouvement et correspondent à une dissipation d'énergie calorifique.*

★ EXERCICES ★

153. — Une bobine comporte 1 000 spires de 50 $\overline{cm}^2$ de surface. On approche de cette bobine un aimant qui, en $\frac{1}{10}$ seconde, crée une induction de 50 gauss. Calculer la f. e. m. induite moyenne. — **Rép.** : *E = 0,25 volt.*

154. — Une bobine plate de fil souple comporte 50 spires de 1 200 cm² de surface; elle est disposée normalement au champ terrestre en un lieu où l'inclinaison est $i = 60°$ et la composante horizontale 0,2 gauss. On aplatit cette bobine en $\frac{1}{10}$ seconde; calculer la f. e. m. induite.

155. — Un cadre rectangulaire ABCD est placé normalement à un champ d'induction magnétique uniforme $B_1 = 1$ **tesla** (*fig. 166*). Une traverse KL se déplace de C vers B avec une vitesse constante de 1 cm/s. Calculer la f. e. m. induite qui apparaît dans KL. Indiquer le sens des courants induits dans les boucles ABKL et KCDL, en supposant que l'induction B_1 est dirigée vers l'arrière du tableau. En supposant que les fils conducteurs ont une résistance de 2.10^{-4} ohm par cm de longueur, calculer l'intensité des courants circulant dans les portions AB, CD et KL lorsque KL est au tiers de la distance CB à partir de C. AB = 2 cm BC = 6 cm.
Rép. : *2.10^{-4} volt; sens des aiguilles d'une montre dans ABKL, sens inverse dans KCDL; intensité dans KL : 0,174 A; dans AB : 0,065 A; dans CD : 0,109 A.*



166.

156. — Un cadre placé dans un champ d'induction uniforme comporte 200 spires rectangulaires de 8 $\overline{cm}^2$ de surface; l'induction est de 200 gauss. A l'instant initial le cadre a son plan parallèle aux lignes de force; en 0,1 seconde, on amène ce cadre perpendiculairement aux lignes de force. Calculer la f. e. m. induite.
Rép. : *32 mV.*

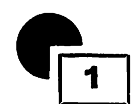
157. — Deux solénoïdes coaxiaux sont indépendants l'un de l'autre; l'un, extérieur, comporte 20 spires par cm de longueur et est parcouru par un courant de 10 ampères. L'autre, intérieur, est formé par 500 spires de 100 $\overline{cm}^2$ de section et a une résistance de 10 ohms. L'intensité dans le solénoïde extérieur variant régulièrement de 0 à 10 ampères pendant 5 secondes, calculer l'intensité du courant qui parcourt pendant ce temps le solénoïde intérieur. En déduire la quantité de chaleur dégagée dans ce solénoïde.

158. — Un avion métallique de 12 mètres d'envergure, vole horizontalement à la vitesse de 720 km/heure; la composante verticale du champ d'induction terrestre vaut 0,55 gauss. Calculer la différence de potentiel induite entre les extrémités des ailes. — **Rép.** — *0,132 volt.*

CHAPITRE XIX

✱ AIMANTATION DU FER ET DE L'ACIER

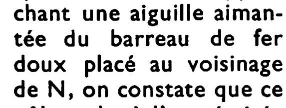
1. Les propriétés magnétiques du fer doux.
2. Les propriétés magnétiques de l'acier.
3. Électro-aimants.
4. Ampèremètres à fer doux.



LES PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DU FER

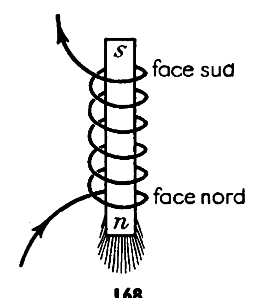
■ **179. Expérience fondamentale.** — Pour reconnaître expérimentalement l'aimantation d'une substance, nous utiliserons les phénomènes d'attraction qu'exerce cette substance sur la limaille de fer ou sur un barreau de fer doux.

Un barreau de fer doux (fer pur), plongé dans de la limaille de fer ne l'attire pas (*fig. 167-1*). Plaçons ce barreau dans un champ magnétique en l'approchant d'un aimant NS : la limaille de fer est attirée (*fig. 167-2*) le fer doux s'est aimanté. Éloignons l'aimant : la limaille de fer tombe (*fig. 167-3*); toute trace d'aimantation du barreau a disparu.



167.

Reprenons la première expérience en précisant *le sens de l'aimantation*. L'aimant permanent SN crée dans l'espace une induction magnétique dont la direction est donnée par les lignes de force qui sortent par le pôle nord N. En approchant une aiguille aimantée du barreau de fer doux placé au voisinage de N, on constate que ce barreau acquiert un pôle sud *s* à l'extrémité où entrent les lignes de force et un pôle nord *n* à l'autre extrémité. On dit que *l'aimantation du barreau de fer doux s'est faite dans le sens de l'induction* due au champ magnétisant.



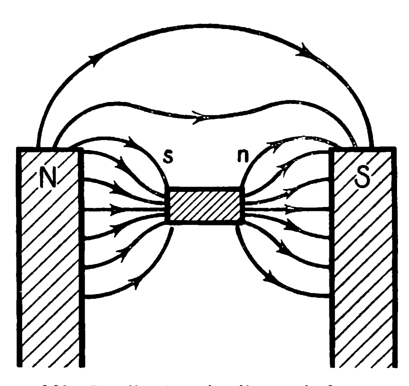
168.

Le même phénomène peut être étudié de façon plus complète en plaçant le barreau de fer doux dans un solénoïde (*fig. 168*). Quand le

solénoïde est parcouru par un courant, la limaille de fer est attirée et elle tombe quand le courant est interrompu. Le sens de l'aimantation est bien celui de l'induction créée par le solénoïde : on vérifie avec une aiguille aimantée que les pôles nord et sud du barreau coïncident respectivement avec les faces nord et sud du solénoïde seul. On peut constater d'autre part que l'aimantation est d'autant plus grande que le courant qui passe est plus intense, c'est-à-dire que l'induction créée dans le vide est plus grande. En effet la force d'attraction peut devenir suffisante pour attirer des clous, des morceaux de fer.

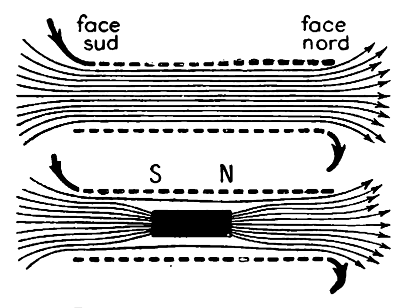
▶ *Un barreau de fer doux placé dans un champ magnétique s'aimante dans le sens de l'induction qui existe dans ce champ : un pôle sud apparaît à la face d'entrée des lignes de force. Si l'induction magnétique extérieure cesse, le barreau se désaimante.*

■ **180. Canalisation des lignes de force : perméabilité.** — Plaçons un barreau de fer doux dans un champ magnétique d'induction uniforme, entre les pôles d'un aimant en fer à cheval (*fig. 169*) ou à l'intérieur d'un solénoïde (*fig. 170*). Réalisons *le spectre magnétique* en saupoudrant de limaille de fer un carton placé sur l'ensemble. Nous constatons que la présence du fer doux modifie beaucoup le spectre : les lignes de force qui étaient des droites parallèles s'incurvent et viennent se concentrer aux pôles du barreau de fer doux comme si elles traversaient plus facilement le fer que l'air. On dit que le fer doux est ***plus perméable*** aux lignes de force.



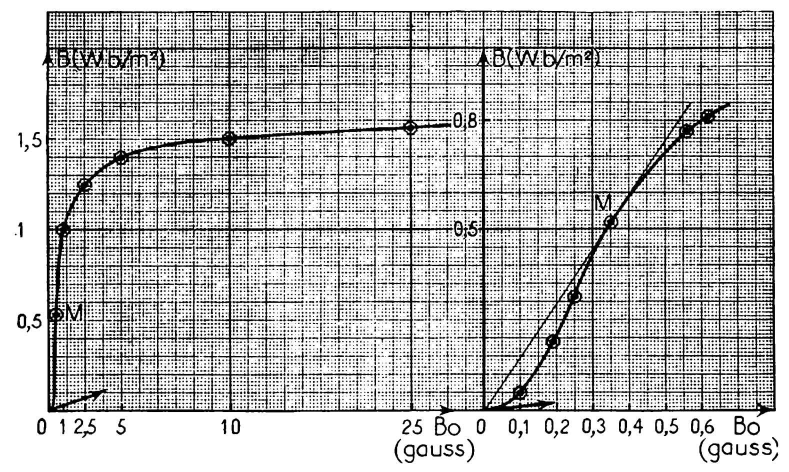
169. Canalisation des lignes de force par un barreau de fer doux.

Ce resserrement des lignes de force correspond à l'existence dans le fer d'une induction bien supérieure à celle qui existait dans le vide (ou dans l'air). Nous l'avons déjà constaté au § *172*, en étudiant l'induction électromagnétique. Rappelons que nous pouvons définir la perméabilité relative du fer par rapport au vide par le rapport $\mu_r = \frac{B}{B_0}$ des inductions existant dans un barreau de fer infiniment long placé dans un solénoïde infiniment long créant dans le vide l'induction B_0. Pratiquement il suffira de prendre un barreau 500 fois plus long que son diamètre (aiguille de 50 cm de longueur pour 1 mm de diamètre).



170. Perméabilité du fer doux.

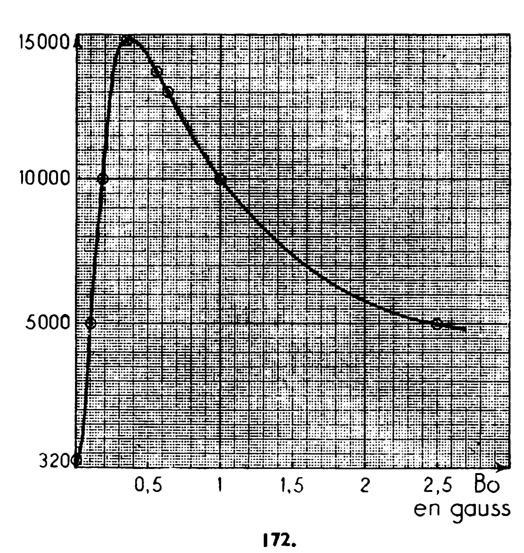
L'état d'aimantation peut être



171. Courbe de première aimantation pour un échantillon de fer.

caractérisé par la valeur de B définie par les conditions précédentes. On constate expérimentalement que B varie avec B_0 comme l'indique la courbe de la *figure 171*, réalisée avec un barreau de fer doux n'ayant jamais été aimanté (*courbe de première aimantation*).

On voit sur la courbe de gauche que B augmente d'abord rapidement avec Bo puis beaucoup plus lentement. Joignons un point M de la courbe à l'origine; le coefficient angulaire de la droite OM représente le rapport $\frac{B}{B_0} = \mu_r$. La courbe de droite représente à une échelle 25 fois plus grande en abscisses et 2 fois plus grande en ordonnées la variation de B pour des valeurs faibles de Bo. Ce graphique met en évidence un maximum de la perméabilité μ_r qui d'après le tableau des résultats expérimentaux est obtenu pour $B_0 = 0{,}35$ gauss, $\mu_r = 14\,800$. La courbe de la *figure 172* représente d'ailleurs la variation de μ_r avec B_0. On remarquera enfin que la perméabilité initiale n'est pas nulle ($\mu_r = 320$) : la tangente à la courbe B au point O n'est pas horizontale. Les courbes ont été volontairement limitées à des valeurs faibles de B_0, mais le tableau montre la décroissance de μ_r pour des valeurs de B_0 de l'ordre de 100 gauss.



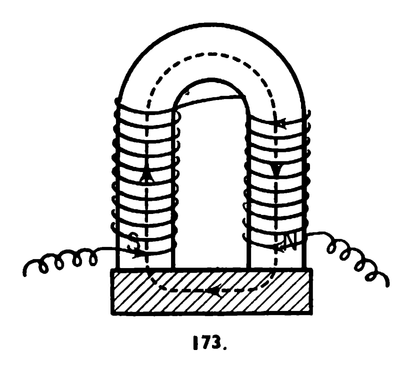
172.

Résultats expérimentaux pour un échantillon de fer doux.

B_0 (gauss)	B (gauss)	B (tesla)	μ_r
0,1	500	0,05	5 000
0,125	940	0,094	7 500
0,19	1 900	0,19	10 000
0,25	3 100	0,31	12 400
0,35	5 200	0,52	14 800 (max.)
0,56	7 700	0,77	13 700
0,62	8 100	0,81	13 100
1	10 000	1	10 000
2,5	12 500	1,25	5 000
5	14 000	1,4	2 800
10	15 000	1,5	1 500
25	15 600	1,56	625
50	17 000	1,7	340
100	18 000	1,8	180

On peut aussi caractériser l'aimantation par l'intensité d'aimantation J. Un petit volume aimanté *v* possède un moment magnétique M : on appelle ***intensité d'aimantation*** le quotient $J = \frac{M}{V}$.

J varie avec l'intensité de l'induction excitatrice B_0 et tend vers une limite quand B_0 croît beaucoup. On dit qu'il y a ***aimantation à saturation.*** C'est à partir de cette aimantation que B varie linéairement avec B_0 (droite sur la courbe de *la figure 171*).



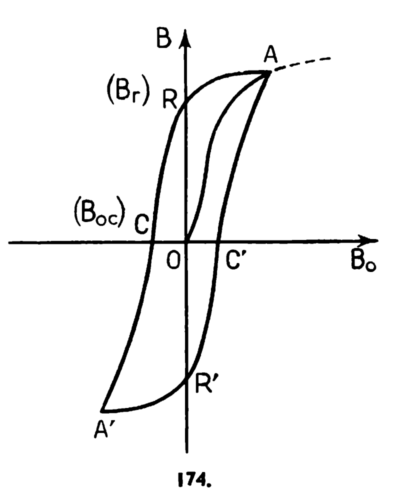
173.

◇ **181. Aimantation rémanente et hystérésis.** — Prenons un morceau de fer doux en forme d'U et enroulons sur chacune de ses branches deux bobines de façon qu'elles créent un pôle nord N et un pôle sud S aux deux faces qui limitent l'U (*fig. 173*). Lorsque ces bobines sont parcourues par un courant, le fer doux se comporte comme un aimant en fer à cheval. Approchons une barre de fer doux des pôles : elle est vivement attirée et *nous ne pouvons plus déceler de pôles libres* : aucune ligne de force ne sort de cet ensemble qui constitue un *circuit magnétique fermé.*

Coupons le courant : la barre de fer doux reste collée au fer en U et il faut exercer une force non négligeable pour l'enlever. Nous devons interpréter ce fait en admettant que, en l'absence de B_0, une aimantation du fer subsiste. On l'appelle ***aimantation rémanente*** et on la caractérise par la valeur de l'***induc-***

tion rémanente Br. Cette induction rémanente dépend de l'induction maximum qui avait été établie; elle peut atteindre 1 à 1,5 tesla pour du fer doux.

L'existence de cette aimantation rémanente nous amène à penser que lorsqu'on diminue l'induction B_0 créée par le solénoïde, l'induction dans le fer doux ne doit pas reprendre les mêmes valeurs sans quoi on décrirait la courbe de la *figure 171* par valeurs décroissantes et on reviendrait en O. Effectivement l'expérience montre que la désaimantation du fer se *fait avec retard* : c'est le phénomène d'***hystérésis***. La courbe obtenue étant OA à l'aimantation, celle qui correspond à la désaimantation est AR : en R, B_0 est nul et on a l'induction rémanente Br (*fig. 174*).



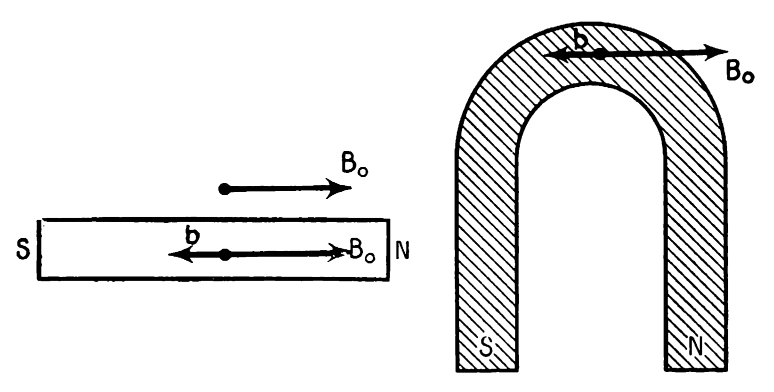
174.

On peut annuler l'aimantation rémanente en créant, par inversion du courant dans le solénoïde, une induction B_0 de sens contraire : on décrit RC. La valeur B_0c qui annule B correspond à un effet ***coercitif*** (de contrainte). B_0c est faible dans le cas du fer : selon la pureté du fer, elle varie entre 0,04 gauss et 0,28 gauss.

Continuons à faire croître B_0 (en valeur absolue) à partir de Boc : la courbe se prolonge de C en A'. Si nous diminuons $|B_0|$, nous obtenons alors A'R' puis en inversant le courant, R'C'A. On ne retrouve plus la courbe d'aimantation primitive; on obtient une courbe fermée appelée ***cycle d'hystérésis*** ARCA'R'C'A (*fig. 174*).

◇ **182. Effet démagnétisant des pôles.** — L'existence du magnétisme rémanent paraît être en contradiction avec les expériences fondamentales du § *179* dans lesquelles nous avons constaté que la désaimantation du fer était spontanée.

Pour élucider cette contradiction, reprenons l'expérience d'aimantation



175. Induction **démagnétisante** *b* due aux pôles libres N et S.

d'un circuit magnétique fermé (*fig. 173*) mais intercalons entre le fer en U et le morceau de fer doux une feuille de papier ou de carton très mince. Faisons passer le courant : l'armature de fer doux est encore attirée, mais dès que nous coupons le courant, l'attraction cesse. Ainsi la simple rupture du circuit magnétique ou la création d'un *entrefer* a suffi pour faire disparaître l'aimantation rémanente.

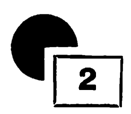
Interprétons : la présence de l'entrefer a créé deux pôles N et S au fer en U; or ces pôles produisent en chaque point du fer doux (*fig. 175*) une induction $\vec{b}$ de sens contraire à l'induction due au solénoïde de sorte qu'en un point M du fer il existe en fait un *effet démagnétisant* qui diminue l'action de B_0. Si l'induction *b* qui est due à l'aimantation rémanente est égale ou supérieure à B_0c, la désaimantation se produit.

On comprend ainsi que toute trace d'aimantation disparaisse lorsqu'on annule B_0.

■ **183. Applications.** — Résumons les propriétés magnétiques du fer doux.

Dans un champ magnétique, un barreau de fer doux s'aimante dans le sens de l'induction excitatrice de l'aimantation. Cette aimantation se traduit par l'existence d'une induction considérable à l'intérieur du fer : le fer possède une grande perméabilité. Lorsque l'induction extérieure s'annule, il devrait subsister une aimantation (aimantation rémanente) qui disparaît cependant du fait de l'action démagnétisante des pôles libres, sauf dans le cas d'un circuit magnétique fermé.

Ces différentes propriétés sont utilisées dans les ***électro-aimants*** (§ *186*) et dans tous les appareils où on a besoin de réaliser de très fortes inductions : dynamos, alternateurs, transformateurs.

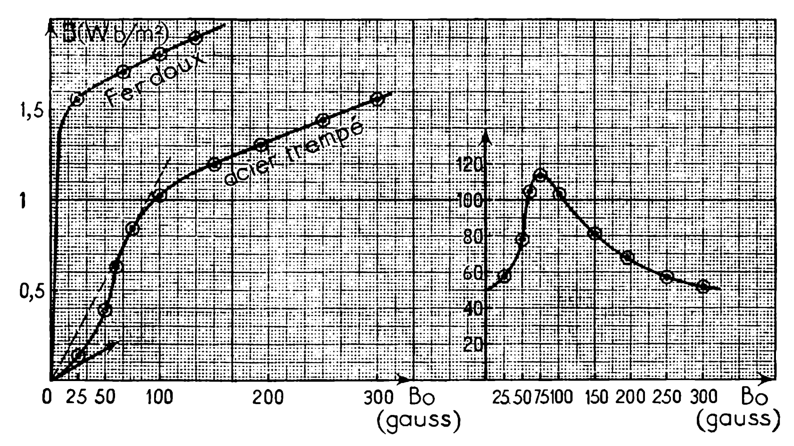


LES PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DE L'ACIER

■ **184. Expériences.** — Nous avons étudié en détail les propriétés magnétiques du fer, car elles se retrouvent, avec leur aspect qualitatif, dans un certain nombre de substances appelées pour cette raison des ***substances ferromagnétiques.*** Ce sont le nickel, le cobalt, les alliages de fer, nickel, cobalt, en particulier les aciers.

On peut donc reprendre avec un barreau d'acier trempé les expériences du § *179* : l'acier, placé dans un champ magnétique, s'aimante comme le fer, mais si on annule l'induction extérieure, l'***aimantation subsiste.*** L'acier conserve au moins en partie une aimantation en dehors du champ magnétique.

En réalisant avec un barreau d'acier l'expérience des spectres magnétiques dans un champ d'induction uniforme, on constate une même déformation des lignes de force : l'acier, comme le fer doux, est ***perméable.*** L'aimantation sera caractérisée par une grande valeur



176. Aimantation du fer doux et de l'acier.

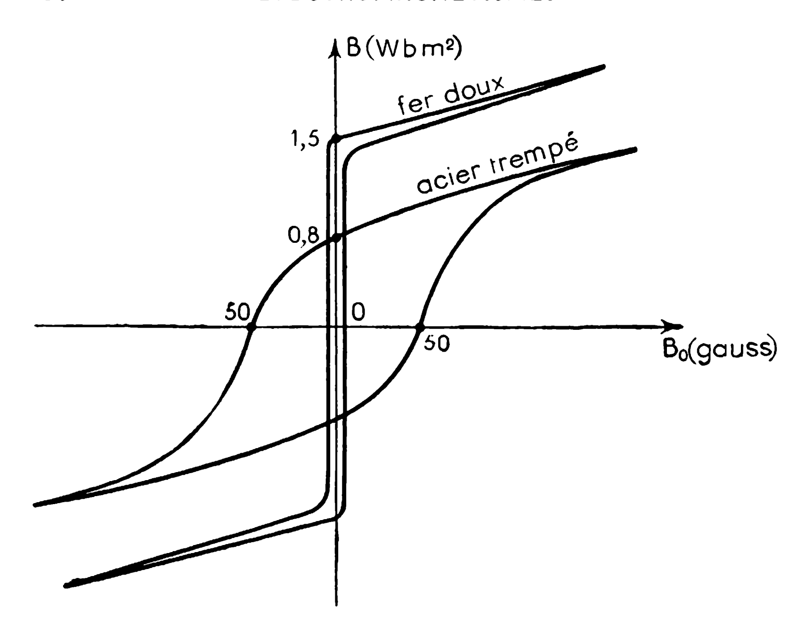
de l'induction B à l'intérieur du barreau. Il faut cependant noter les différences suivantes, par rapport au fer doux, qui découlent de la courbe de première aimantation (*fig. 176*).

1. *L'induction* B *croît beaucoup moins rapidement avec* B_0 : pour $B_0 = 25$ gauss, $B = 1{,}56$ tesla dans le cas du fer doux et $B = 0{,}146$ tesla pour l'échantillon d'acier trempé étudié. L'aimantation à saturation est plus faible que dans le cas du fer doux.

2. *La perméabilité relative maximum est beaucoup plus faible pour l'acier* (113 au lieu de 14 800). Elle est obtenue pour des inductions B_0 beaucoup plus grandes (75 gauss pour l'acier trempé étudié au lieu de 0,35 gauss pour le fer doux).

Résultats expérimentaux pour un échantillon d'acier trempé.

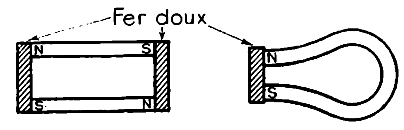
B_0 (gauss)	B (gauss)	B (tesla)	μr
25	1 460	0,146	58,5
50	3 900	0,39	78
60	6 310	0,631	105
75	8 500	0,85	113 (max.)
100	10 300	1,03	103
150	12 000	1,2	80
192	13 000	1,3	67,7
250	14 400	1,44	57,6
300	15 700	1,57	52



177. Cycles d'hystérésis pour le fer doux et pour l'acier trempé.

3. L'étude de l'aimantation rémanente et du cycle d'hystérésis montre (*fig. 177*) que l'aimantation rémanente, observée dans le cas d'un circuit magnétique fermé tout en acier comme dans le cas du § *181*, *est plus faible pour l'acier que pour le fer doux* (maximum de $B_r = 0{,}8$ tesla au lieu de 1,5 tesla). Enfin la valeur de B_0c qui annule cette aimantation (effet coercitif) est *beaucoup plus grande* pour l'acier que pour le fer doux (50 gauss au lieu de 0,3 gauss). Il en résulte que le cycle d'hystérésis d'un acier trempé est plus large : sa surface est plus grande. La *figure 177* permet de comparer toutes ces propriétés. La valeur élevée de B_0c explique pourquoi l'acier reste aimanté quand il n'est plus dans un champ magnétique : l'induction démagnétisante créée par les pôles libres est inférieure à B_0c.

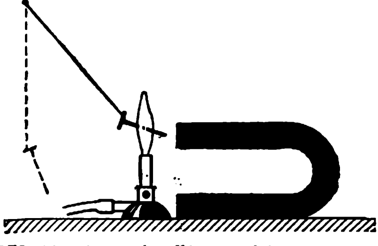
■ **185. Applications. Aimants permanents.** — Les aimants permanents sont très utilisés dans les galvanomètres, les ampèremètres, les magnétos, les aiguilles aimantées, ... Ils doivent avoir une *aimantation rémanente grande* et *ne pas se désaimanter facilement*, ce qui exige une valeur assez forte de B_0c et exclut évidemment le fer doux. L'acier possède les deux qualités requises, mais on lui préfère actuellement des aciers spéciaux contenant du nickel, du cobalt et parfois de l'aluminium et du cuivre. On utilise ainsi le *Ticonal* (Fe 51 %, Ni 14 %, Co 24 %, Al 8 %, Cu 3 %) pour lequel $B_r = 1{,}27$ tesla et $B_0c \simeq 100$ gauss. Malheureusement l'usinage de tels alliages est difficile en raison de leur dureté; aussi leur donne-t-on des formes géométriques simples (barreaux droits).

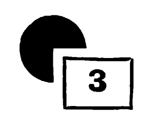


178. Conservation des aimants.

Ces barreaux sont toujours soumis à l'action démagnétisante des pôles; il est recommandé, pour les conserver, de les associer comme le montre la *figure 178* où des armatures de fer doux, fermant le circuit magnétique, suppriment les pôles.

¶ **Remarque :** Les propriétés magnétiques disparaissent par élévation de température : le fer perd ses propriétés magnétiques à 774° C. Un clou attiré par un aimant (*fig. 179*) ne l'est plus lorsqu'on le chauffe.

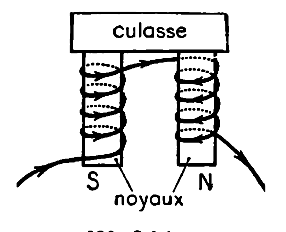

179. Un clou, chauffé, ne s'aimante plus.



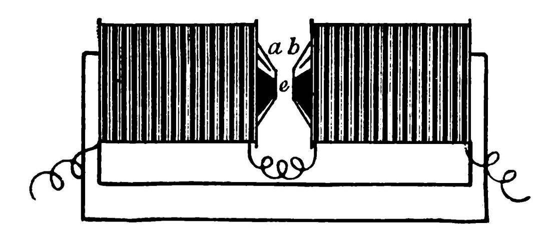
ÉLECTRO-AIMANTS

■ **186. Principe.** — Une pièce de fer doux, appelée *noyau* est placée à l'intérieur d'une bobine. Quand celle-ci est parcourue par un courant, le noyau devient un aimant; quand le courant cesse, le noyau se désaimante. On obtient ainsi un *aimant temporaire*. Très souvent (*fig. 180*), il se compose de deux noyaux semblables réunis par une *culasse* de fer doux. L'enroulement des deux bobines est tel que le courant crée un pôle nord à l'extrémité libre de l'un et un pôle sud à l'extrémité de l'autre. On démontre que les effets magnétiques d'un tel électro-aimant sont d'autant plus grands que le nombre de tours N et l'intensité I sont plus grands.

Les électro-aimants sont utilisés, ou bien comme appareils *producteurs* de fortes inductions, ou bien comme appareils producteurs *d'attraction mécanique* du fer ou des substances ferro-magnétiques par cet aimant temporaire.



180. Schéma d'électro-aimant.



181. Production d'inductions magnétiques intenses.

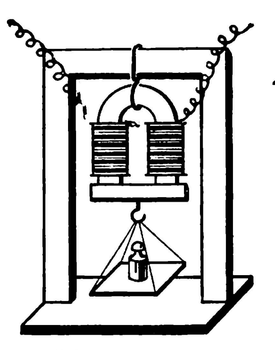
Photo Hachette.

182. Électro-aimant de l'Académie des Sciences, au laboratoire de Bellevue.

Entre les pièces polaires, on aperçoit un vase **Dewar** contenant de l'azote liquide. Le jour de la prise du cliché, des expériences étaient réalisées sur l'influence du champ magnétique sur les propriétés des corps aux basses températures.

■ 187. Production de grandes inductions magnétiques. — Nous avons vu que le fer doux canalisait les lignes de force de sorte que si on donne à l'électro-aimant la forme indiquée par la *figure 181*, l'induction qui règne dans l'entrefer e est pratiquement égale à l'induction dans les pièces polaires *a* et *b*.

Le grand électro-aimant de l'*Académie des Sciences*, au laboratoire de *Bellevue* (*fig. 182*) permet d'obtenir des inductions de 4 à 7 tesla dans des volumes de l'ordre de 20 $\overline{cm}^3$. Son poids total est de 120 tonnes; les noyaux pèsent 80 tonnes. Les bobines ont 2 mètres de diamètre; les enroulements sont faits d'un tube parcouru par un courant d'eau froide pour éviter l'échauffement dû aux fortes intensités de courant qui sont de l'ordre de 400 ampères. La puissance consommée est de l'ordre de 100 kW.



183. Force portante d'un électro-aimant.

■ 188. Applications des phénomènes d'attraction. — Dans de nombreuses applications l'électro-aimant est utilisé pour attirer des morceaux de fer. Il peut alors avoir des formes très diverses.

Prenons un électro-aimant en fer à cheval (*fig. 183*) muni de son armature et portant un plateau sur lequel on peut placer des poids. Faisons passer dans les bobines un courant intense et chargeons le plateau avec des poids de plus en plus lourds. Il arrive un moment où l'armature se détache : les poids qui sont alors dans le plateau mesurent la *force portante* de l'électro-aimant. On démontre que la force portante s'exprime par la formule

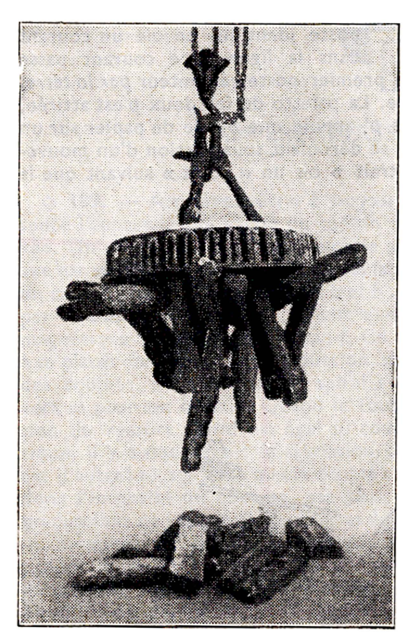
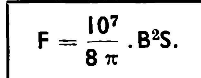


Photo Hachette.

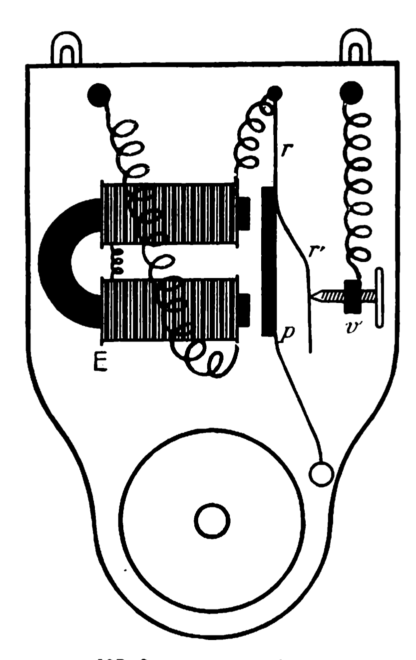
184. Électro-aimant de levage.



$$F = \frac{10^7}{8\pi} . B^2 S.$$

B induction tesla ; S surface des pôles en $\overline{m}^2$; F est alors exprimé en newtons.

Les électro-aimants de levage ont une forme aplatie (*fig. 184*) : ils sont manœuvrés au moyen d'une grue et permettent de soulever des pièces métalliques magnétiques. On arrive avec des inductions de 1,6 tesla à des forces portantes de 1 newton par $\overline{cm}^2$.

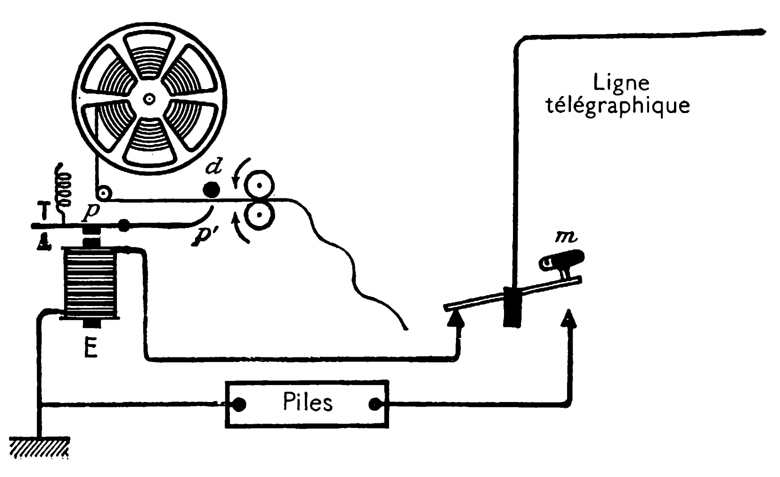


185. Sonnerie trembleuse.

Les phénomènes d'attraction peuvent être utilisés de façon intermittente : c'est le cas de la sonnerie trembleuse, du télégraphe, du récepteur téléphonique et de nombreuses autres applications.

Dans la ***sonnerie trembleuse,*** le courant traverse un électro-aimant E (*fig. 185*), les lames de ressort *r*, *r'*, la vis de réglage *v*, si on appuie sur le bouton interrupteur (non représenté sur la figure sur laquelle on n'a pas indiqué le circuit amenant le courant). La palette de fer doux, armature, est attirée et le marteau frappe le timbre. A ce moment le ressort *r'* quitte la vis *v*, le contact est rompu et la lame ressort *r* rappelle la palette à sa position de départ.

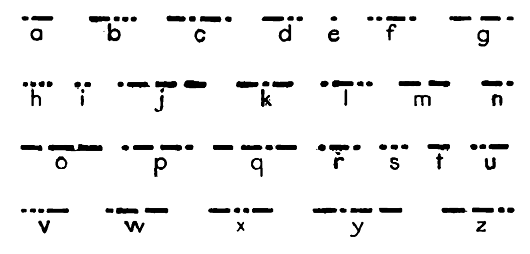
Le ***télégraphe*** est représenté par la *figure 136*. Le manipulateur Morse *m* est placé dans la position de réception. Supposons qu'un autre poste identique envoie un courant dans la ligne : ce courant passe dans l'électro-aimant E et retourne au premier poste générateur *par la terre*, ce qui évite l'usage de deux fils de ligne. La palette de fer doux *p* est attirée, fait pivoter un levier dont l'autre bras *p'* appuie une bande de papier sur un disque encreur *d*. La bande de papier se déroulant sous l'action d'un mouvement d'horlogerie, s'y produit un « trait » ou un « point » suivant que la



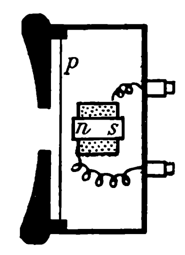
186. Principe du télégraphe.

durée de passage du courant est longue ou brève. L'alphabet Morse (*fig. 187*) réalise les lettres grâce à une combinaison de ces points et traits.

Si l'on veut expédier un message, on appuie sur le manipulateur *m* pour envoyer le courant des piles dans la ligne; l'autre poste reçoit alors le message.

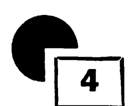



187. Alphabet morse.



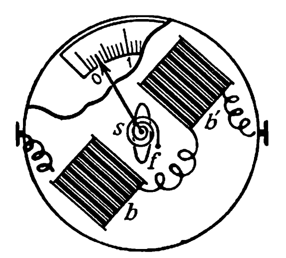
188. Récepteur téléphonique.

Le ***récepteur téléphonique*** comporte un électro-aimant d'un genre particulier. Son noyau *ns* (*fig. 188*) est un *aimant permanent*. Les variations du courant qui suivent celles de la voix modifieront l'aimantation du noyau, donc l'attraction de la plaque métallique *p*. Nous verrons en acoustique que la plaque reproduit alors les sons émis devant le microphone.



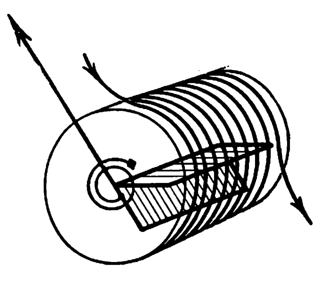
AMPÈREMÈTRES À FER DOUX

◇ **189. — Ampèremètre à noyau de fer doux.** — La *figure 189* représente l'appareil, une partie du cadran étant enlevée. Un noyau de fer doux *f*, mobile autour d'un axe est solidaire d'une aiguille se déplaçant devant un cadran gradué. Deux bobines *b* et *b'*, traversées par le courant à mesurer, créent une induction magnétique qui aimante le noyau *f*. Ce noyau tend à se placer dans le sens de l'induction, suivant l'axe des bobines, mais un ressort spiral *s* le rappelle vers sa position initiale. Quand le couple de torsion du ressort spiral est égal au couple magnétique, il y a équilibre : la déviation de l'aiguille est d'autant plus grande que le couple magnétique, donc l'intensité du courant, est plus grand. Les graduations de l'appareil ne sont pas équidistantes, le moment du couple magnétique n'étant pas proportionnel à l'intensité du courant. Le sens du courant importe peu car si ce sens change, l'aimantation du fer doux et la direction du champ changent tous deux; le sens du couple n'est donc pas modifié. L'appareil est robuste, mais la précision des mesures ne dépasse guère 5 %. La graduation est faite directement en ampères par comparaison avec un « *ampère-étalon* ».



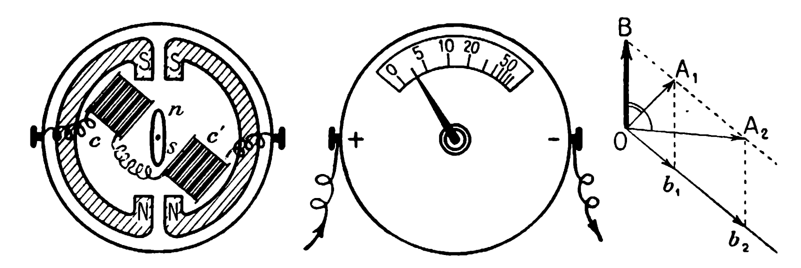
189. Ampèremètre à fer doux.

◇ **190. Ampèremètre à lames de fer doux.** — Le principe de cet appareil est schématisé par la *figure 190*. Le courant à mesurer parcourt une bobine où se trouvent, parallèles à l'axe, deux lames de fer doux. L'une des lames est fixe, l'autre mobile autour de l'axe de la bobine, mais maintenue par un ressort spiral. Quand le courant passe dans la bobine, les deux lames deviennent des aimants ayant leurs pôles nord du côté de la face nord, leur pôles sud de l'autre côté. Ces pôles de même nom sont voisins et se repoussent; la lame mobile tourne autour de l'axe jusqu'à ce que le couple de torsion du spiral compense le couple magnétique. Comme dans le premier ampèremètre, le sens du courant importe peu. L'appareil est gradué par comparaison avec un ampère-étalon.



190. Ampèremètre à lames de fer doux.

◇ **191. Ampèremètre à aimant mobile.** — Cet appareil (*fig. 191*) diffère de l'ampèremètre à fer doux du fait que le fer doux est remplacé par un aimant permanent *sn*. Il est rappelé vers sa position d'équilibre à vide (lorsqu'il ne passe



191. Ampèremètre à aimant mobile.

pas de courant) par l'action d'une induction B due à deux forts aimants permanents SN. Lorsque le courant passe dans les deux bobines *c* et *c'*, elles créent des inductions variables avec l'intensité, b_1, b_2, ... L'aimant se place selon les résultantes OA_1, OA_2, etc... et sa déviation dépend de l'intensité. L'appareil est gradué par comparaison avec un ampère-étalon.

◀ *RÉSUMÉ* ▶

Un barreau de ***fer doux,*** *placé dans un champ magnétique, s'aimante : il acquiert un pôle sud à l'extrémité où entrent les lignes de force.*

Cette aimantation se traduit par l'existence dans le fer d'une ***induction beaucoup plus grande*** *que dans l'air : le fer possède une grande* ***perméabilité.*** *Lorsque l'induction extérieure s'annule, l'aimantation du fer doux disparaît sous l'effet démagnétisant des pôles libres. En circuit magnétique fermé, il subsiste une aimantation appelée* ***aimantation rémanente.***

L'acier possède des propriétés analogues; cependant il est ***moins perméable*** *et surtout l'aimantation rémanente n'est pas annulée par l'effet*

démagnétisant des pôles. L'acier reste donc aimanté en dehors d'un champ magnétique : il est utilisé pour la fabrication des ***aimants permanents.***

Les ***électro-aimants*** *sont constitués par des noyaux de fer doux placés à l'intérieur de bobines parcourues par un courant. On les utilise soit pour produire des inductions magnétiques très intenses, soit comme appareils de levage, ou encore pour produire des attractions intermittentes comme celles en usage dans la sonnerie trembleuse, le télégraphe, etc.*

Dans les ***ampèremètres à fer doux,*** *une pièce de fer doux s'aimante, puis se déplace sous l'action d'une induction magnétique produit par une bobine parcourue par le courant à mesurer. Elle est maintenue dans une position d'équilibre par un ressort spiral; une aiguille solidaire de cette pièce indique l'intensité par lecture sur un cadran. L'appareil est gradué par comparaison avec un « ampère-étalon ».*

★ EXERCICES ★

159. — Un solénoïde de 20 cm de long produit en son centre une induction de 100 gauss. Quel est le nombre d'ampères-tours? — **Rép. :** *1 590.*

160. — Pour un certain échantillon de fer, les valeurs de B_0 et de la perméabilité magnétique μ correspondant sont :

B_0 gauss	1	2	5	10	50
μ	6 000	5 000	2 600	1 500	340

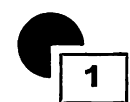
1° Tracer la courbe donnant μ en fonction de B_0.
2° Calculer les valeurs correspondantes de l'induction B Wb/m².
3° Tracer la courbe donnant B en fonction de B_0.

161. — Sur un noyau de fer de perméabilité magnétique $\mu = 500$, en forme de fer à cheval, de 9,76 $\overline{cm}^2$ de section, est enroulé un solénoïde formé de 8 couches d'un fil isolé de 2 mm de diamètre, à spires jointives, parcouru par un courant de 1 ampère. Quelle est en newtons et en kgf la force portante de cet électro-aimant?

CHAPITRE XX

GALVANOMÈTRE ET AMPÈREMÈTRE À CADRE MOBILE

1. Principe du galvanomètre.
7. Galvanomètre Desprez-d'Arsonval.
3. Ampèremètre et voltmètre à cadre mobile.



PRINCIPE DU GALVANOMÈTRE

■ **192. Action d'un champ uniforme sur un cadre.** — Soit un cadre AA′CC′ (*fig. 192*) suspendu à deux fils de torsion verticaux, fils conducteurs reliant le cadre à un circuit électrique; plaçons ce cadre dans un champ magnétique d'induction uniforme B horizontal et supposons la torsion des fils nulle lorsque le plan du cadre est parallèle à l'induction.

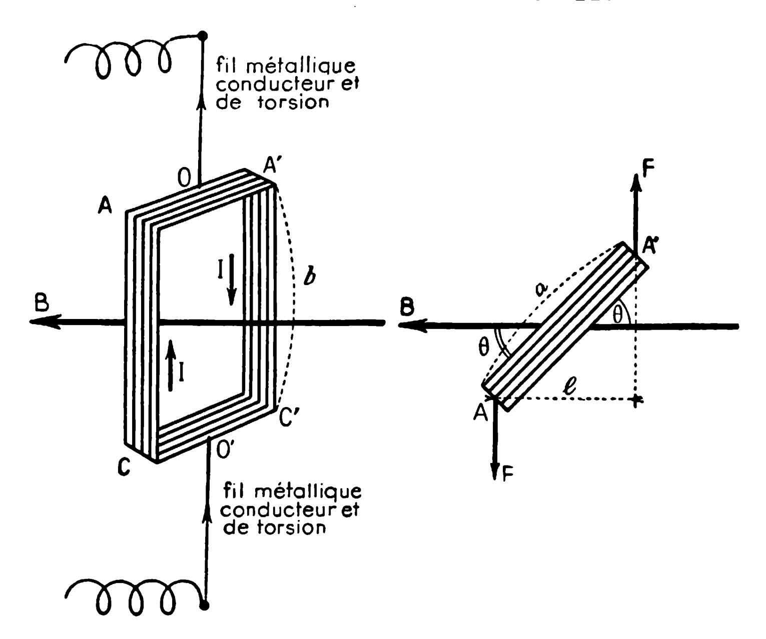
Faisons passer un courant dans le cadre, le sens de parcours étant celui de la figure. Le cadre est soumis à des forces électromagnétiques et tend à se placer perpendiculairement à l'induction de façon à recevoir par sa face sud le flux maximum; mais, lorsqu'il tourne, les fils de torsion exercent un couple antagoniste. Finalement le cadre atteindra une position d'équilibre correspondant à l'égalité des deux couples pour une rotation θ.

Appliquons la loi de Laplace aux différents brins du cadre. Sur les côtés horizontaux AA′ et CC′, les forces exercées sont verticales et de sens contraires; elles s'équilibrent et n'ont aucun effet. Sur le côté vertical AC s'exerce une force horizontale F, normale à B, dont le sens, donné par la règle des 3 doigts, est indiqué sur la figure; sur le côté vertical A′C′ s'exerce une force parallèle, égale et de sens contraire. *Ces deux forces forment un couple*. Calculons le moment du couple : supposons que le cadre comportant N spires, ait pour dimensions $AA' = a$, $CC' = b$, qu'il soit parcouru par le courant d'intensité I. La force qui s'exerce sur les N brins AC a pour valeur :

$$F = N\,I\,b\,B$$

Le bras de levier du couple, distance des deux forces, est :

$$l = a.\cos 0.$$



192. Action d'un champ d'induction uniforme sur un cadre.

Le moment du couple est donc :

$$M = F.l = N.I.bBa \cos\theta.$$

Si S est la surface d'une spire, $S = a.b$,

$$M = B.N.I.S \cos\theta.$$

Lorsque les fils de suspension se tordent de l'angle θ, le moment du couple de torsion est $M_1 = C\theta$, C étant la constante de torsion du fil.

Il y a équilibre pour l'angle θ, si $M = M_1$, d'où :

$$C\theta = B.I.NS \cos\theta.$$

Cette équation n'est pas simple, mais montre qu'à chaque valeur θ correspond une intensité bien définie; la mesure de θ permet donc de calculer I. Il faut exprimer θ en radians.

Supposons la rotation petite, de l'ordre de quelques degrés : cos θ reste alors très voisin de 1 et on pourra écrire

$$C\theta = B.I.N.S.$$

▶ *Pour de faibles rotations du cadre, l'intensité est proportionnelle à l'angle de rotation.*

193. Sensibilité. — L'appareil de mesure de l'intensité, le galvanomètre, sera d'autant plus sensible que la déviation θ correspondant à une intensité donnée sera plus grande. On peut donc prendre comme expression de la sensibilité le quotient : $\sigma = \frac{\theta}{I}$

$$\sigma = \frac{B.N.S}{C}.$$

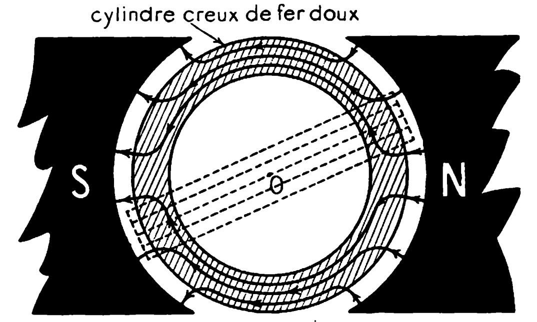
On augmente σ en augmentant B, N, S et en diminuant C. L'induction B est généralement celle qui existe entre les deux pôles d'un aimant en fer à cheval; on prend des aimants puissants, voire des électro-aimants.

En augmentant le nombre N de spires, on alourdit le cadre ce qui le fera osciller plus lentement. On peut augmenter la surface S, mais si le cadre est trop large, il a une grande période d'oscillation et n'atteint sa position d'équilibre que lentement.

Pour diminuer la constante de torsion du fil, on choisit des fils d'argent très fins, ce qui a l'inconvénient d'augmenter la résistance au passage du courant. On préfère actuellement des rubans ou des ressorts spirale.

Remarque : Cette valeur de la sensibilité n'est correcte que pour de petits angles. On prévoit que la sensibilité décroît quand θ devient grand car pour $\theta = \frac{\pi}{2}$ l'équation d'équilibre deviendrait : $C\frac{\pi}{2} = NIBS \times 0$ ce qui exigerait I infini. Pour éviter la décroissance de la sensibilité, on utilise le galvanomètre à champ radial.

194. Galvanomètre à champ radial. — Entre les deux pôles d'un aimant en fer à cheval, on dispose un cylindre de fer doux, souvent creux (*fig. 193*). Les deux pôles sont munis de pièces polaires évidées laissant entre elles une cavité cylindrique creuse. Les brins actifs du cadre AA′ et CC′ se déplacent dans l'entrefer situé entre le cylindre et les pièces polaires.

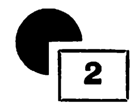


193. Champ radial.

Les lignes de force, en raison de la perméabilité très grande du fer doux, traversent l'entrefer normalement au cylindre, donc suivant les rayons, d'où le nom de champ à induction radiale ou champ radial. Les forces F qui s'exercent sur les côtés verticaux, normales à l'induction, sont tangentes au cylindre; le bras de levier du couple est toujours égal à *a*, au lieu de *a* cos θ et l'équation d'équilibre devient :

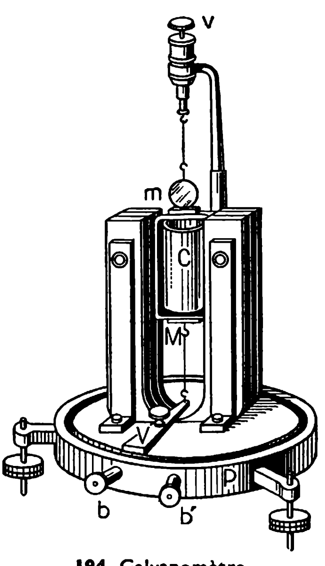
$$C\theta = NISB.$$

Quel que soit θ, la sensibilité est constante; de plus l'induction dans l'entrefer est très grande, ce qui augmente la sensibilité.



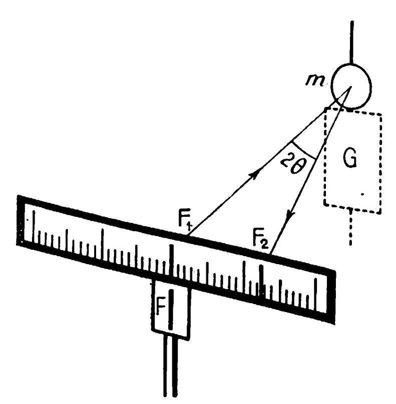
GALVANOMÈTRE DESPREZ-D'ARSONVAL

■ **195. Description.** — On essaie de réaliser au mieux toutes les conditions précédentes. L'induction magnétique est produite par un aimant en fer à cheval (*fig. 194*), formé de plusieurs feuilles d'acier serrées les unes contre les autres : on constate que le champ est plus intense qu'avec un seul aimant de même volume. Le courant arrive par une borne *b*, passe dans la lame de ressort réglée par la vis *v*, dans le fil de torsion inférieur, le cadre M, le fil de torsion supérieur, la potence de suspension, et sort par la borne *b'*. La vis *v* permet à la fois de régler l'orientation initiale du cadre, et la tension des fils de torsion. Pour transporter l'appareil, on desserre *v* complètement, et le cadre repose sur le cylindre de fer doux C. Des vis calantes servent à assurer la verticalité du plan du cadre; la rainure du plateau P reçoit la base d'une cloche protectrice en verre.



194. Galvanomètre **Desprez-d'Arsonval.**

L'appareil peut déceler des courants de l'ordre de 10^{-10} ampère.



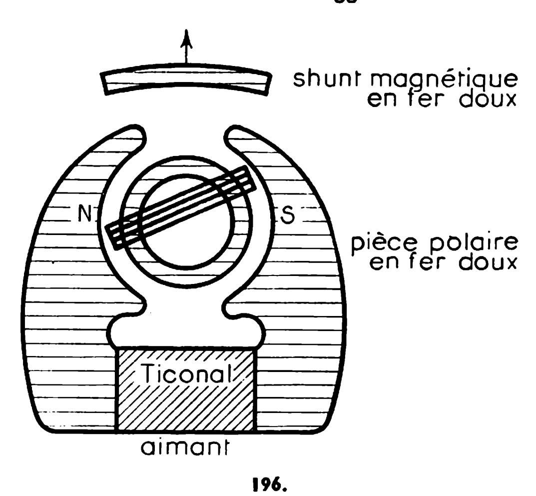
195. Méthode de **Poggendorff.**

■ **196. Usages.** — Le galvanomètre à cadre mobile est d'un usage constant dans les laboratoires; sa mise en place et son réglage sont faciles et rapides. Il peut être utilisé de deux façons.

D'abord comme ***appareil de zéro;*** cela veut dire qu'on lui demande d'indiquer si oui ou non il est traversé par un courant, sans s'occuper de la valeur de ce courant. Il se comporte alors comme un appareil sensible pouvant déceler des courants d'environ *un dix-milliardième d'ampère.*

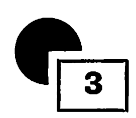
On peut aussi l'employer à la ***mesure de très faibles intensités***, à condition de l'avoir étalonné par avance, en y envoyant des courants d'intensités connues.

Pour observer avec beaucoup de sensibilité la rotation du cadre, on utilise la méthode de Poggendorff. Le cadre est surmonté d'un miroir concave *m*; au centre de ce miroir est placé le filament vertical F (*fig. 195*) d'une lampe à incandescence; l'image de retour (spot lumineux) se fait en F_1 sur une graduation translucide. Si le cadre tourne d'un angle θ, le rayon réfléchi tourne de 2 θ et le spot vient en F_2. On calcule facilement $\operatorname{tg} 2\theta = \frac{F_1F_2}{mF_1}$.



196.

Les galvanomètres modernes sont beaucoup moins encombrants que le galvanomètre précédent. Ils sont constitués par un barreau aimanté droit en alliages spéciaux tel que le ticonal, soudé à des pièces polaires en fer doux créant un champ à induction radiale (*fig. 196*). Le cadre est solidaire de deux ressorts spirale. On peut modifier leur sensibilité grâce à une lame de fer doux qui, approchée des pièces polaires dérive une partie du flux, diminuant ainsi la valeur de l'induction dans l'entrefer qui atteint au maximum 0,2 à 0,3 Wb/m^2,



AMPÈREMÈTRE ET VOLTMÈTRE A CADRE MOBILE

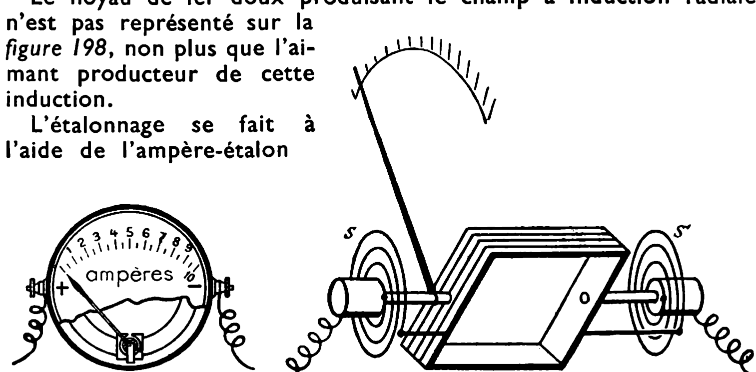
■ **197. Description de l'ampèremètre.** — Le fonctionnement est exactement le même que celui du galvanomètre, mais la construction est plus robuste (*fig. 197* et *198*). Le cadre tourne autour d'un axe monté sur pivots, et l'effet de torsion des fils est remplacé par celui de deux ressorts spiraux *s* et *s'* conduisant le courant. Le cadre entraîne dans sa rotation une aiguille dont l'extrémité se déplace devant un cadran gradué en ampères (ou multiples, ou sous-multiples d'ampère).

L'appareil ne peut fonctionner que pour un sens de courant bien déterminé; on sait qu'en changeant le sens du courant, on ferait

tourner le cadre en sens inverse. Aussi des signes + et — indiquent la borne d'entrée et la borne de sortie de l'appareil. Quelquefois le zéro est au milieu du cadran et la déviation se fait dans l'un ou l'autre sens suivant le sens du courant.

Le noyau de fer doux produisant le champ à induction radiale n'est pas représenté sur la *figure 198*, non plus que l'aimant producteur de cette induction.

L'étalonnage se fait à l'aide de l'ampère-étalon



197. Ampèremètre à cadre mobile. **198.** Détail du cadre mobile.

L'enroulement du cadre ne peut supporter en général que de très faibles courants; aussi les ampèremètres sont toujours shuntés intérieurement et comportent souvent plusieurs sensibilités (*voir* § *89*). La résistance du cadre est de l'ordre d'une dizaine d'ohms.

■ **198. Voltmètre à cadre mobile.** — Nous avons vu au § *66* qu'un voltmètre était toujours constitué par un ampèremètre très sensible (ne consommant qu'un courant très faible *i*) *mis en série* avec une grande résistance. Si *r* est la résistance totale de l'ensemble, l'appareil peut mesurer une différence de potentiel $V_A - V_B = ri$. Le voltmètre à cadre mobile comprend donc les mêmes parties qu'un ampèremètre à cadre : aimant permanent à champ radial, cadre, ressorts spirale; en série avec le cadre on place à l'intérieur une ou plusieurs résistances permettant d'obtenir une ou plusieurs sensibilités. La résistance propre du cadre est de l'ordre de 100 ohms.

◀ *RÉSUMÉ* ▶

Le ***galvanomètre à cadre mobile*** *est constitué par un cadre suspendu par des fils de torsion dans un champ d'induction uniforme créé par un aimant en fer à cheval. Sur ce cadre sont enroulées des spires de fil conducteur aboutissant aux fils de torsion. Quand le cadre est parcouru par un courant il est soumis à un* ***couple électro-magnétique*** *et prend une position d'équilibre correspondant à l'égalité de ce couple avec le couple de torsion. Pour les petites déviations, l'intensité du courant qui traverse le cadre est proportionnelle à l'angle de déviation.*

*Cette proportionnalité est toujours réalisée dans le **galvanomètre à champ radial** dans lequel un noyau de fer doux canalise les lignes de force de l'aimant.*

*La déviation du cadre est repérée par la **méthode de Poggendorff,** par rotation du rayon lumineux réfléchi par un miroir concave solidaire du cadre.*

Le galvanomètre est surtout utilisé comme appareil de zéro.

*L'**ampèremètre à cadre mobile** repose sur le même principe mais il est plus robuste, le cadre étant mobile sur pivots; le couple de torsion est alors donné par deux ressorts spiraux. Une aiguille, solidaire du cadre, se déplace devant un cadran gradué en micro-ampères, milliampères, ampères; c'est un appareil à lecture directe.*

*Le **voltmètre à cadre** mobile comprend un ampèremètre sensible mis en série avec une grande résistance.*

★ EXERCICES ★

162. — Le cadre d'un galvanomètre, de surface 8 $\overline{\text{cm}}^2$, comporte 40 spires; il peut tourner dans un champ d'induction uniforme de 500 gauss, et sa rotation est de 60° pour un courant de 1 milliampère. Calculer la constante de torsion C de l'ensemble des deux fils. — **Rép.** : *7,65 cm × dyne par radian.*

163. — Le même appareil est maintenant muni d'un dispositif à champ radial. Quel est l'intensité du courant qui produirait la même rotation de 60° ?

164. — Le miroir du même appareil avec champ radial se trouve à 1 m de la règle graduée du dispositif de Poggendorff. Quelle est l'intensité du courant correspondant à un déplacement du spot de 1 mm ? — **Rép.** : *0,24 micro-ampère.*

165. — On envisage le même galvanomètre : 1° sans champ radial; 2° avec champ radial. Construire dans chacun des cas la courbe donnant la sensibilité $s = \frac{\theta}{I}$ (ordonnées) en fonction de la rotation θ (abscisses). On fera varier θ de 0° à 60°.

166. — Pour quel angle de rotation la sensibilité d'un galvanomètre à cadre sans champ radial et avec champ radial diffèrent-elles de 10 % ? — **Rép.** : *25° 50′.*

167. — Montrer que le déplacement du spot dans la méthode de Poggendorff est en réalité proportionnel à tg 2θ. Comparer les valeurs de $\frac{1}{2}$ tg 2θ et de θ pour un déplacement de spot de 16 cm à une distance de 1 m du miroir. Quelle est l'erreur relative ?

TABLEAU DES PRINCIPALES FORMULES DE L'ÉLECTRICITÉ

- ÉLECTRICITÉ :

quantité d'électricité. . . $Q = I \times t.$

électrolyse . . . . . . $m = \frac{1}{96\,500} \times \frac{A}{n} \times I \times t.$

effet Joule . . . . $W = RI^2t$; q calories $= \frac{W \text{ joules}}{4{,}18}.$

résistance . . . . $R = \rho \frac{l}{s}.$

d. d. p. aux bornes de
- générateur . $V_P - V_N = E - rI.$
- récepteur. . $V_{P'} - V_{N'} = e + rI.$
- résistance pure. . . $V_A - V_B = RI$ (dans le sens du courant).

formule de Pouillet généralisée . . . . $I = \frac{\Sigma E - \Sigma e}{\Sigma R}.$

résistance équivalente. . . $\frac{1}{R} = \Sigma \frac{1}{r}.$

- PUISSANCE MISE EN JEU :

générateur (puissance totale). . . . . $P = EI.$

récepteur (puissance utilisable) . . . . . $P = eI.$

effet Joule . . . . $P = RI^2$ ou $\frac{V^2}{R}.$

entre 2 points quelconques d'un circuit. $P = (V_A - V_B)I.$

- MAGNÉTISME :

loi de Coulomb. . . . . . $F = 10^{-7} \frac{mm'}{d^2}$ $B = 10^{-7} \frac{m}{d^2}.$

moment magnétique . . . $\mathcal{M} = ml.$

action d'une induction magnétique sur un pôle . . $F = mB.$

- ÉLECTROMAGNÉTISME :

induction créée par un solénoïde infiniment long. $B = \frac{4\pi}{10^7} \frac{N}{l} I,$

action d'un champ sur un courant . . . . $F = BIl \sin\alpha.$

flux d'induction magnétique. . . . . $\Phi = SB \cos\theta.$

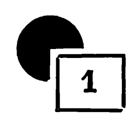
travail des forces électromagnétiques. . . . . . $W = I(\Phi_2 - \Phi_1).$

loi fondamentale de l'induction. . . . . . . $E = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$

IV. OPTIQUE

CHAPITRE XXI

PROPAGATION RECTILIGNE DE LA LUMIÈRE



L'OPTIQUE

■ **199. La lumière.** — L'optique a pour but l'étude des phénomènes lumineux, c'est-à-dire des phénomènes qui impressionnent l'œil. On attribue à *la lumière* la sensation physiologique ainsi perçue. Il y a des degrés dans cette sensation : lumière faible, lumière éblouissante, lumière blanche, lumière colorée.

On distingue *des objets lumineux par eux-mêmes* tels que le soleil, les lampes à incandescence, les tubes fluorescents, une bougie, etc. et des *objets éclairés* qui *diffusent* la lumière qu'ils reçoivent d'une source : l'écran d'une salle de cinéma, une feuille de papier, et d'une façon générale tout objet visible.

Nous ne ferons dans la suite aucune différence essentielle entre ces deux catégories et nous les appellerons indistinctement *source lumineuse* ou simplement *objet lumineux*.

■ **200. L'optique géométrique et l'optique physique.** — On divise l'étude de l'optique en deux grandes parties : l'optique physique et l'optique géométrique.

La première s'occupe avant tout de la nature même du phénomène lumineux et des propriétés qui en découlent. Nous n'en retiendrons que les deux points suivants :

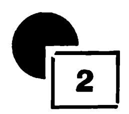
1° La lumière est due à la propagation à travers l'espace d'une onde analogue aux ondes utilisées en T. S. F. Chaque onde est caractérisée

dans le vide par un nombre appelé « longueur d'onde »; l'œil est sensible aux radiations dont les longueurs d'onde sont comprises entre 0,4 μ et 0,75 μ (le μ est le micron ou millième de mm). La sensation de couleur dépend de la longueur d'onde : 0,75 μ pour le rouge, 0,6 μ pour le jaune, 0,4 μ pour le violet. La lumière blanche est une lumière complexe, comportant un grand nombre de radiations dites *monochromatiques* correspondant à un grand nombre de longueurs d'onde.

2° Dans le vide la lumière se propage, quelle que soit sa longueur d'onde, à la vitesse de 300 000 km par seconde. La durée de propagation entre deux points à la surface de la terre est souvent négligeable. Par contre la lumière met 8 minutes 13 secondes pour venir du soleil, 46 ans pour venir de l'étoile polaire.

L'optique géométrique fait abstraction de la nature de la lumière et n'étudie que sa direction de propagation dans les différents milieux.

■ **201. Corps transparents; corps opaques.** — Certaines substances telles que l'eau, le verre, etc. se laissent entièrement traverser par la lumière. Elles sont *transparentes*. D'autres ne se laissent traverser que partiellement par la lumière : tels sont les verres fumés des lunettes que l'on porte en été; elles sont *absorbantes*. Un écran de carton, une feuille métallique arrêtent complètement la lumière : ce sont des *corps opaques*. Enfin certaines substances laissent passer la lumière mais ne permettent pas de distinguer la forme des corps placés derrière elles; ce sont des corps *translucides*. Citons le verre dépoli, le papier huilé, les globes diffusants qui sont utilisés dans l'éclairage des salles.



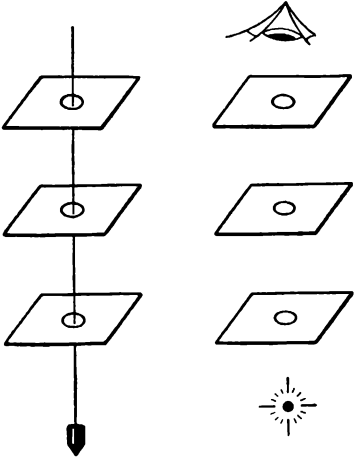
LA LUMIÈRE SE PROPAGE EN LIGNE DROITE

■ **202. Expérience.** — Des faits d'observation courante nous montrent que la lumière doit se propager en ligne droite : illumination des poussières par la lumière solaire pénétrant dans une chambre obscure, illumination du brouillard par la lumière d'un phare ou d'un projecteur.

Prenons trois diaphragmes, c'est-à-dire trois écrans percés d'un trou; alignons leurs ouvertures à l'aide d'un fil à plomb (*fig. 199*). Retirons le fil à plomb avec précaution et plaçons une lampe à incandescence sous le diaphragme inférieur. L'œil placé au-dessus du diaphragme supérieur perçoit la lumière de la lampe; un écran dépoli mis à la place de l'œil est alors éclairé. Si nous déplaçons transversalement l'un quelconque des trois diaphragmes, aucune lumière ne parvient dans l'œil ou sur l'écran.

▶ ***Principe de la propagation rectiligne de la lumière.*** *Dans un milieu transparent homogène, la lumière se propage en ligne droite.*

Sur ce principe repose toute l'optique géométrique; la vérification s'en fera dans ses conséquences mêmes : ombres, éclipses,...



199. Propagation rectiligne de la lumière.

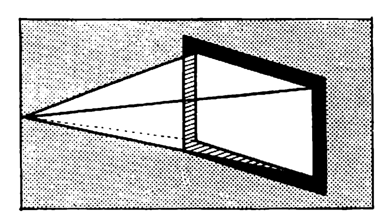
■ 203. Rayons lumineux. Faisceaux lumineux.

▶ ***Définition.*** *On appelle rayon lumineux tout trajet rectiligne suivi par la lumière. Un faisceau lumineux est un ensemble de rayons.*

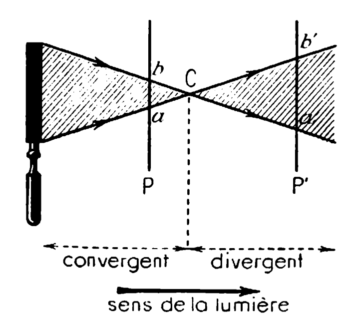
On représentera un rayon lumineux par une droite portant une ou plusieurs flèches indiquant le sens de propagation.

On ne peut isoler un rayon lumineux mais on peut, au moyen de diaphragmes comme nous l'avons fait dans l'expérience précédente, obtenir des faisceaux très étroits.

Dans une salle obscure, salle de cinéma, on distingue, à cause des poussières en suspension dans l'air, le faisceau lumineux qui va en s'élargissant de l'appareil de projection à l'écran. On dit que c'est un faisceau ***divergent*** (*fig. 200*). D'une façon plus précise nous désignerons sous ce nom un ensemble de rayons issus d'un point.

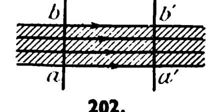


200. Faisceau divergent.



201. La loupe peut former un faisceau convergent.

A l'aide d'une loupe, on peut concentrer la lumière solaire sur une très petite surface; le faisceau sortant de la loupe va en se rétrécissant; on l'appelle un faisceau ***convergent*** (*fig. 201*). Un faisceau convergent est formé par un ensemble de rayons qui se dirigent vers un point. Après le point de convergence C, le faisceau devient divergent. On étudie la forme d'un faisceau en déplaçant un écran de P en P' : on obtient une succession de taches lumineuses *ab*, *a'b'*, de dimensions variables (*fig. 201*).



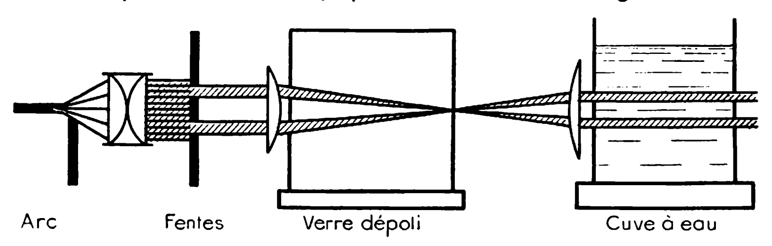
202. Faisceau parallèle.

Un faisceau est dit ***cylindrique*** ou ***parallèle*** lorsque tous les rayons qui le composent sont parallèles entre eux. Sa section par des écrans parallèles conserve une dimension constante

(*fig. 202*). Le point lumineux d'où divergerait ou bien où convergerait le faisceau est alors rejeté à l'infini. Un faisceau parallèle est émis par un point lumineux très éloigné, tel qu'une étoile ou un point particulier du soleil (bord supérieur, centre...).

■ **204. Etude expérimentale des faisceaux lumineux.** — Il est de première importance pour la compréhension de l'optique de pouvoir mettre en évidence d'une façon simple la marche des faisceaux lumineux dans les milieux transparents.

Les sources lumineuses les plus utilisées dans les expériences de cours sont l'arc électrique, les lampes à incandescence, quelquefois les bougies. La lumière émise par le cratère positif de l'arc électrique est reçue par un système optique appelé condenseur qui permet d'obtenir des faisceaux divergents parallèles ou convergents, ou d'éclairer fortement des objets. En plaçant devant le condenseur un écran percé de fentes parallèles, on peut isoler un certain nombre de faisceaux étroits ou pinceaux lumineux, à partir d'un faisceau de large ouverture.



203. Mise en évidence de faisceaux par leur trace sur le verre dépoli ou par la fluorescéine dans l'eau.

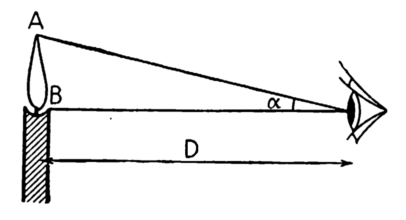
La propagation de la lumière dans l'air peut être mise en évidence soit en créant artificiellement des poussières illuminées par le faisceau : craie ou fumée de tabac, soit mieux en plaçant un écran en verre dépoli selon l'axe du faisceau : on aperçoit nettement la trace des rayons sur le verre dépoli. Dans l'eau il suffit de diluer un peu de fluorescéine : sur le trajet des faisceaux l'eau devient fluorescente et émet une belle lumière verte. La *figure 203* indique quelques expériences correspondant à ces remarques.

Le condenseur transforme le faisceau divergent en un faisceau parallèle; les fentes isolent deux pinceaux qui, après traversée d'une lentille passent par un point. Sur le verre dépoli on voit 2 traces lumineuses convergentes. Les pinceaux divergent ensuite. Une autre lentille donne deux faisceaux parallèles illuminant la fluorescéine.

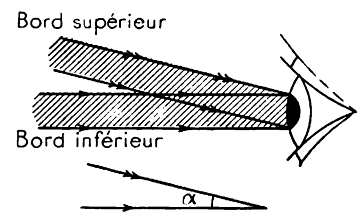
■ **205. Objets lumineux. Points lumineux.** — Observons la flamme d'une bougie : ses deux extrémités A et B sont vues de l'œil sous un certain angle α (*fig. 204*). Exprimé en radians, cet angle a pour mesure $\alpha = \frac{AB}{D}$; cet angle diminue lorsque la distance D augmente. On l'appelle le *diamètre apparent* de l'objet.

▶ **Définition.** *On appelle diamètre apparent d'un objet l'angle des deux rayons issus des extrémités de l'objet et pénétrant dans l'œil.*

Éloignons-nous de la bougie : lorsque nous sommes à 100 mètres environ, elle ne nous apparaît plus que comme un point. Son diamètre apparent est devenu trop petit pour être perçu par l'œil. On admet



204. La bougie est vue sous le diamètre apparent α.



205. Deux rayons issus des bords supérieurs et inférieurs du soleil font l'angle α.

en moyenne que l'œil voit comme un point tout objet dont le diamètre apparent est inférieur à une minute sexagésimale ou environ $\frac{3}{10\,000}$ radian.

Une *étoile* nous paraît un *point lumineux* à l'infini : tous les rayons issus de l'étoile sont parallèles entre eux.

Le soleil, la lune sont des *objets lumineux* à l'infini : ils sont caractérisés par leur diamètre apparent qui est voisin de 1/2 degré. ***Chaque point du soleil envoie un faisceau de lumière parallèle mais tous ces faisceaux ne sont pas parallèles entre eux (fig. 205).***

Remarque : La formule $\alpha = \frac{AB}{D}$ n'est pratiquement valable que si l'angle α est petit, inférieur à $\frac{1}{10}$ radian ou 6°.

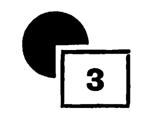
● EXEMPLE. — *La distance de la terre à la lune étant de 382 000 km, calculer la distance de deux points de la surface de la lune juste séparés par l'œil.*

La distance angulaire de ces deux points est au moins égale à $\frac{3}{10\,000}$ radian.

Or

$$\alpha = \frac{AB}{D}; \qquad AB = D\alpha.$$

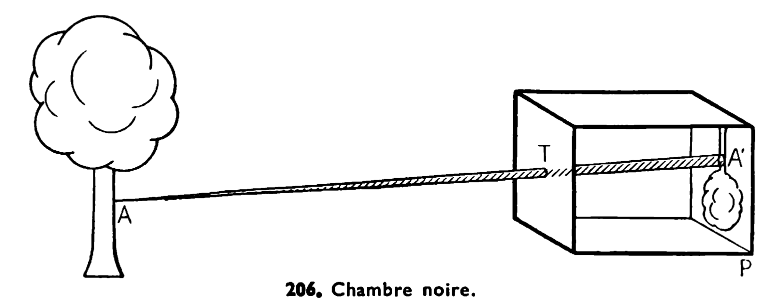
$$AB = \frac{3}{10\,000} \times 382\,000 \# 115 \text{ km.}$$



APPLICATIONS

■ **206. Chambre noire.** — Soit une boîte entièrement fermée dont le fond est muni d'un papier translucide ou d'un verre dépoli P (*fig. 206*) afin de pouvoir observer par transparence les effets lumineux qui s'y

produisent. Au centre de la face opposée, on a percé à l'aide d'une aiguille un petit trou T, à bords bien nets. Dirigeons l'appareil vers un arbre bien éclairé : nous voyons se former sur le fond de la chambre noire une image renversée de l'arbre, avec toutes ses couleurs.



206. Chambre noire.

En effet, un point A de l'arbre envoie dans la chambre un pinceau lumineux limité par le trou T, qui fait une tache lumineuse A′ sur le verre dépoli. Il en est de même pour tous les points de l'arbre, et on obtient finalement une image renversée de l'arbre. Cette image n'est pas absolument nette; pour qu'elle le soit, il faudrait que la tache A′ fût réduite à un point, ce qui n'est pas possible, car pour laisser entrer de la lumière il faut bien que le trou T ait une certaine dimension.

¶ **Remarque 1 :** Le verre dépoli peut être remplacé par une plaque photographique; ce procédé de photographie sans objectif a été employé sous le nom de **sténopé.** Si l'on reproduit un dessin, on constate que la reproduction lui est parfaitement homothétique : ce qui constitue une vérification de la propagation rectiligne de la lumière (homothétie par rapport à T).

¶ **Remarque 2 :** En été, les rayons du soleil passent entre les feuilles des arbres; sur le trottoir, on peut observer des taches lumineuses circulaires, qui ne sont autres que les images du soleil.

● **EXEMPLE.** — *A l'aide d'une chambre noire de 12 cm de profondeur, on photographie un monument de 6 m de haut, situé à 30 m. Quelle est la hauteur de sa photographie?*

Le trou T étant centre d'homothétie, le rapport d'homothétie est : $\frac{12}{3\,000}$ = **0,004.** La longueur de l'image du monument sera :

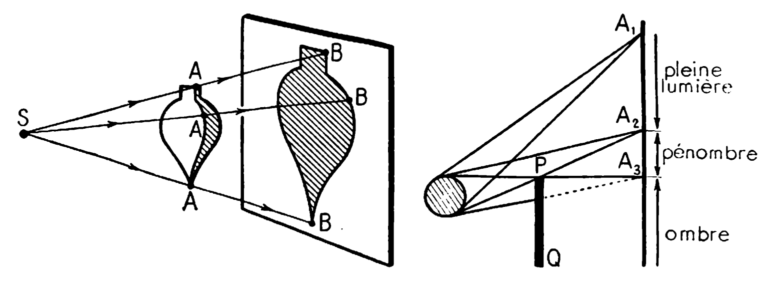
600 × 0,004 = 2,4 cm.

■ 207. Ombres et pénombres.

— Prenons une source lumineuse ponctuelle S (*fig. 207*) (petit trou éclairé vivement, arc électrique, etc...), et plaçons un corps opaque, par exemple une toupie, entre cette source et un écran blanc. Certains rayons lumineux seront arrêtés par la toupie : ils éclairent la toupie, mais non l'écran sur lequel on observe l'ombre de la toupie : c'est une ***ombre portée.*** La toupie elle-même n'est pas éclairée dans la région de son ***ombre propre.*** Les rayons lumineux correspondant au bord de l'ombre portée sont tangents à la toupie le long de la ligne qui sépare l'ombre propre de la zone éclairée (rayon SAB).

¶ **Remarque :** L'ombre portée ne reçoit aucune lumière; l'ombre propre est atténuée par la lumière diffusée par les parties éclairées de l'écran : elle est moins foncée que l'ombre portée.

La source, au lieu d'être ponctuelle, peut avoir une certaine étendue (flamme de bougie, lampe opaline, etc.). — Soit A_1 un point de l'écran qui reçoit de la lumière venant de toute la source (*fig. 208*) (l'œil en A_1 verrait toute la source), bien qu'on ait interposé un écran opaque PQ entre celle-ci et l'écran blanc. Abaissons le point A_1; en A_2 les rayons

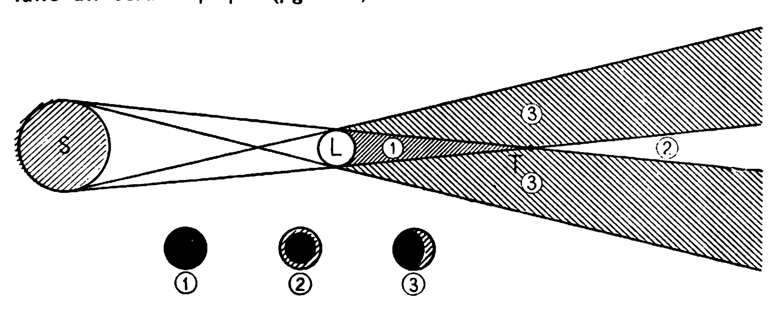


207. Ombre d'une toupie.

208. Ombre et pénombre.

issus de la source peuvent encore toucher l'écran; mais à partir de ce point, on voit que le cône de sommet A_2 est de plus en plus rogné par le bord P de l'écran opaque; la ***pénombre*** commence, s'épaissit de plus en plus, et, à partir de A_3, il ne peut plus arriver aucune lumière de la source : ici commence la région de l'ombre complète. En somme l'écran est bien éclairé jusqu'en A_2 (pleine lumière); de A_2 en A_3 on observe un dégradé de plus en plus foncé (pénombre); à partir de A_3, c'est l'obscurité (ombre).

■ **208. Eclipses.** — Le soleil est une source lumineuse étendue, et la lune un écran opaque (*fig. 209*). Il en résulte une région 1 (cône



209. Éclipses de soleil.

d'ombre) où aucun point ne reçoit de lumière du soleil S, complètement masqué par la lune L. Pour des points situés dans les régions 2 et 3, le soleil n'est que partiellement masqué par la lune (zones de pénombre). Or la terre passe au voisinage du point T, selon les saisons. Dans la région 1, un observateur ne verra plus le soleil; il y a éclipse totale; en 2 et en 3 il observera une éclipse partielle, annulaire pour la région 2.

Dans les éclipses de lune, c'est au contraire la terre qui joue le rôle d'écran opaque; elle produit sur la lune une ombre et une pénombre, observables la nuit depuis la terre.

◀ *RÉSUMÉ* ▶

*L'**optique** est l'étude des phénomènes lumineux, c'est-à-dire des phénomènes qui impressionnent l'œil.*

*Dans un milieu transparent homogène **la lumière se propage en ligne droite.** On appelle **rayons lumineux** toute droite suivant laquelle se propage la lumière. Un **faisceau lumineux** est un ensemble de rayons. On distingue des **faisceaux divergents** formés par les rayons issus d'un point, des **faisceaux convergents** formés de rayons allant tous passer par un point, des **faisceaux parallèles** constitués de rayons parallèles entre eux.*

*Un **objet lumineux** est caractérisé par son diamètre apparent, angle sous lequel on voit cet objet. Cet angle se mesure en radian par* $\alpha = \frac{AB}{D}$. *Si ce diamètre apparent devient inférieur à une minute sexagésimale, l'œil ne perçoit plus qu'un **point lumineux.***

Le principe de la propagation rectiligne de la lumière permet d'expliquer le fonctionnement de la chambre noire, la production d'ombres et de pénombres, l'existence des éclipses de lune ou de soleil.

★ EXERCICES ★

168. — Un faisceau lumineux a la forme d'un cône circulaire de sommet S, dont l'angle vaut 30°; calculer le rayon de la tache lumineuse sur un écran situé à 5 m de S, et normal à l'axe du cône. — **Rép.** : *1,34 m.*

K **169.** — Sous quel diamètre apparent voit-on un arbre de 6 m de haut situé à 300 m ? Exprimer cet angle en radian, puis en minutes sexagésimales.

170. — On photographie cet arbre avec une chambre noire. Quelle doit être la profondeur de la chambre pour que l'image obtenue mesure 5 mm ? — **Rép.** : *25 cm.*

171. — Une chambre noire de 10 cm de profondeur possède un trou circulaire de 1 mm de diamètre. Quel est le diamètre de la tache lumineuse, image d'un point lumineux situé sur l'axe à une distance de D mètres? Montrer que ce diamètre ne peut pas être inférieur à 1 mm.

172. — Une source ponctuelle S se trouve sur l'axe d'un cercle opaque de diamètre 2 cm et à 1 m de celui-ci; quel est le diamètre de l'ombre portée sur un écran situé à 1,6 m derrière le cercle ? — **Rép.** : *5,2 cm.*

173. — La source ponctuelle précédente est remplacée par un disque lumineux, centré sur le même axe et de même diamètre; quels sont les rayons du cercle d'ombre, du cercle de pleine lumière ? en déduire la largeur de l'anneau de pénombre.

174. — Un éclair se produit à x km d'un observateur; au bout de combien de temps celui-ci voit-il l'éclair? Au bout de combien de temps entend-il le tonnerre? Exprimer x en fonction de la différence t de ces deux instants.

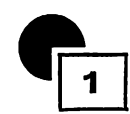
Application : $t = 10$ secondes.

Vitesse du son : 340 m/s. — **Rép.** : *3,4 km;* $x = 0{,}34\ t$.

CHAPITRE XXII

LOIS DE LA RÉFLEXION. MIROIRS PLANS

1. Les deux lois de la réflexion.
2. Images données par le miroir plan.
3. Applications des miroirs plans.



LES DEUX LOIS DE LA RÉFLEXION

■ 209. La réflexion de la lumière. — Recevons la lumière du soleil ou la lumière de l'arc électrique sur une glace de poche : nous constatons qu'une partie de cette lumière est renvoyée par la glace et que le faisceau forme ainsi une tache sur le mur de la salle. Ce phénomène s'appelle la *réflexion* de la lumière. Le faisceau tombant sur la glace est appelé le *faisceau incident;* le faisceau renvoyé par cette glace est appelé le *faisceau réfléchi*. On désigne sous le nom de *miroir* toute surface réfléchissante : une telle surface est nécessairement *polie*.

► ***Définition.*** *Lorsqu'un faisceau lumineux vient frapper une surface polie, une partie de la lumière est renvoyée par cette surface : on dit qu'il y a réflexion de la lumière.*
Un miroir plan est une surface plane réfléchissante.

La vitre d'une fenêtre réfléchit aussi la lumière solaire : c'est un miroir; cependant le faisceau réfléchi par la vitre transparente est moins intense que le faisceau réfléchi par la glace étamée. On est ainsi amené à distinguer la *réflexion vitreuse* obtenue sur le verre, l'eau, les milieux transparents et la *réflexion métallique* obtenue sur des métaux polis.

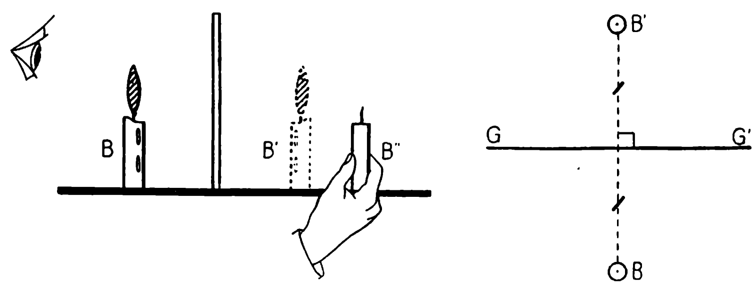
■ 210. Expérience des deux bougies. — Disposons verticalement une glace sans tain et plaçons devant elle une bougie allumée B *(fig. 210)*. Nous apercevons par réflexion sur la glace une reproduction de la bougie : on l'appelle une *image* B′. La glace permet de voir également par transparence une autre bougie éteinte B″ : déplaçons-la de façon qu'elle paraisse à la place de B′ pour toute position de l'œil. On a l'illusion que la bougie B″ est allumée; on peut ainsi marquer sur la

feuille de papier la position de B, celle de son image B′ et celle de la glace GG′ (*fig. 211*). On constate, à l'aide d'une équerre et d'un double décimètre que :

1° la droite BB′ est perpendiculaire au miroir.

2° B et B′ sont à égale distance du miroir.

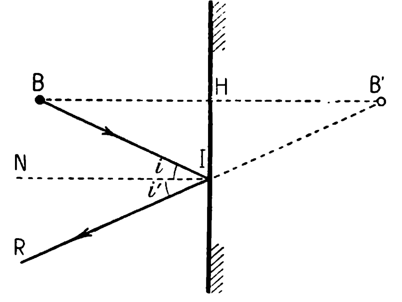
Autrement dit : B *et* B′ *sont symétriques par rapport au plan du miroir.*



210. Expérience des deux bougies.

211. Interprétation.

■ 211. Première loi de la réflexion. — Soit BI un rayon émis par la bougie, c'est un *rayon incident*; il tombe en I sur le miroir (*fig. 212*) : I est le *point d'incidence*. BI fait avec la normale IN au point d'incidence *l'angle d'incidence i*. Le *rayon réfléchi* IR, qui semble provenir de B′, fait avec la normale IN un *angle de réflexion i′*.



212. Lois de la réflexion.

Or IN et BB′, perpendiculaires au miroir, sont parallèles : elles définissent un plan dans lequel se trouvent BI, B′IR, et naturellement IN. L'interprétation de l'expérience précédente nous permet donc d'énoncer la loi suivante qui constitue la première loi de la réflexion :

▶ ***Ire loi.*** *Le rayon incident, la normale au point d'incidence, et le rayon réfléchi sont dans un même plan.*

Cela veut dire que les trois demi-droites IB, IN, IR ne sont pas les arêtes d'un trièdre de sommet I.

Le plan BIN est appelé plan d'incidence. On peut dire aussi :

▶ *Le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence.*

■ 212. Deuxième loi de la réflexion. — Le triangle BIB′ est isocèle, puisque sa hauteur IH est en même temps médiane.

Donc $\widehat{B} = \widehat{B'}$.

Mais $\widehat{B} = i$ (alternes-internes);

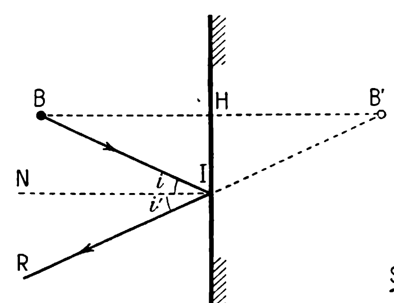
$\widehat{B'} = i'$ (correspondants).

Il en résulte :

$$\boxed{i' = i.}$$

▶ 2[e] **loi.** *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.*

■ **213. Principe du retour inverse de la lumière.** — Supposons qu'un rayon lumineux se propage suivant RI (*fig. 212*) : le rayon réfléchi correspondant sera nécessairement IB puisqu'il doit être dans le plan d'incidence RIN et faire avec la normale IN un angle égal à *i'*. Ce résultat est général et on peut énoncer le principe suivant :

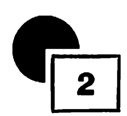


212. Lois de la réflexion.



213. Retour inverse de la lumière.

▶ **Principe.** *Si un rayon lumineux* SI *pénètre dans un système optique quelconque pour en ressortir suivant* I'S' (*fig. 213*), *inversement un rayon lumineux entrant dans le système suivant* S'I' *ressortira suivant* IS.



IMAGES DONNÉES PAR UN MIROIR PLAN

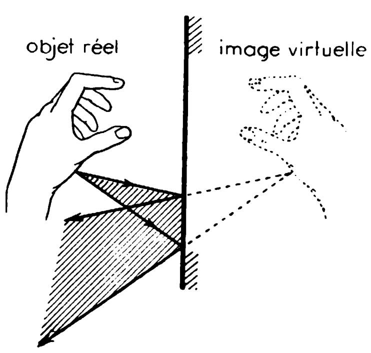
■ **214. Objet réel.** — Il résulte de l'expérience des deux bougies que l'image d'un point lumineux, d'un objet, placés devant un miroir plan semble située derrière le miroir et qu'elle est symétrique de l'objet par rapport au plan du miroir. Il y a cependant une différence essentielle entre l'objet et l'image : l'objet existe, nous dirons que c'est un ***objet réel.*** Par contre la lumière réfléchie, qui nous paraît provenir des différents points de l'image, ne passe pas réellement par ces points. L'image n'a pas d'existence réelle : nous dirons que c'est une ***image virtuelle.***

▶ *Un miroir plan donne d'un objet réel une image virtuelle symétrique de l'objet par rapport au plan du miroir.*

Cette symétrie a deux conséquences importantes :

1° *L'image a même dimension que l'objet* : on dit que le grandissement est égal à 1.

2° *L'image n'est pas en général superposable à l'objet* : l'image d'une main gauche est une main droite (*fig. 214*).

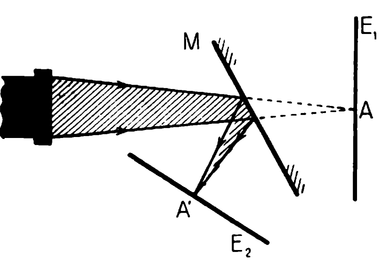


214. L'image d'une main gauche est une main droite.

■ 215. Objet virtuel.

— Réalisons au moyen de l'arc et du condenseur un faisceau convergent en un point A d'un écran E_1 (*fig. 215*); interceptons la lumière par un miroir M incliné et placé en avant de A. Nous constatons que le faisceau réfléchi vient converger en un point A′ d'un écran E_2 et que A′ est symétrique de A par rapport au miroir M.

A′ est l'image de A. Les rayons lumineux, interceptés par le miroir ne vont pas effectivement passer par le point objet A : nous dirons que A est un ***objet virtuel.*** Par contre les rayons réfléchis vont effectivement converger en A′ : A′ est une ***image réelle.***



215. L'image A′ d'un objet **virtuel** A est **réelle.**

▶ *Un miroir plan donne d'un objet virtuel une image réelle symétrique de l'objet par rapport au plan du miroir.*

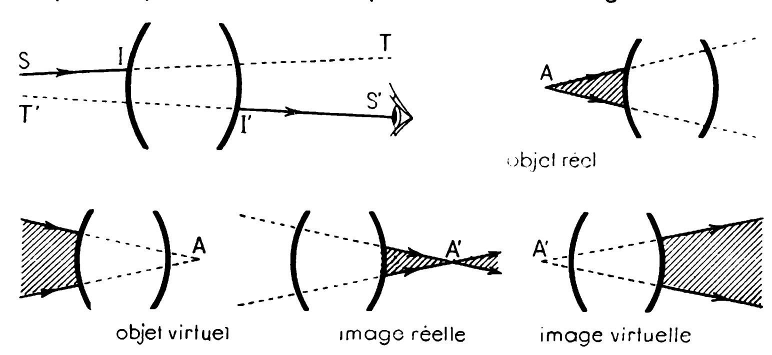
¶ **Remarque :** La symétrie de l'image A′ réelle résulte de l'application du principe du retour inverse : si A′ était un objet, son image serait A symétrique de A′ par rapport au plan de miroir.

■ 216. Généralisation de la notion d'objets ou d'image réels ou virtuels.

— Considérons un système optique quelconque et un rayon SI tombant sur ce système (*fig. 216*). SI est la partie réelle du rayon incident car la lumière passe effectivement en tout point de SI. Prolongeons SI, en pointillés, au-delà du point d'incidence I : la lumière ne passe pas en chaque point de IT; IT est la partie virtuelle du rayon incident. Ainsi c'est la face d'entrée du système optique qui sépare l'espace objet réel (à gauche, sur la figure) de l'espace objet virtuel (à droite de cette face sur la figure).

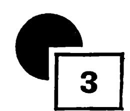
Prenons de même, un rayon émergent I′S′ : I′S′ est sa partie réelle tandis que T′I′ est sa partie virtuelle. La lumière n'a pas parcouru effectivement le trajet T′I′ mais pour l'œil de l'observateur placé sur le rayon émergent, elle semble provenir de la région T′I′. La face de sortie du système sépare l'espace image réelle (à droite) de l'espace image virtuelle (à gauche).

Un point objet réel envoie sur le système un faisceau divergent. Un point objet virtuel est formé par un faisceau convergent.



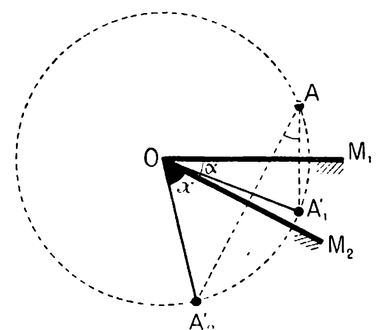
216. Objets et images réels et virtuels.

Un point image est réel si le faisceau émergent va converger en ce point; un point image est virtuel si le faisceau issu de ce point est divergent, en sortant de l'appareil.



APPLICATIONS DES MIROIRS PLANS

■ **217. Miroir tournant.** — Soit un miroir plan (*fig. 217*) mobile autour d'un axe O situé dans son plan et perpendiculaire au plan de figure. Lorsque le miroir est en OM_1, un point lumineux A a pour image A'_1, symétrique de A par rapport à OM_1 : $OA = OA'_1$. Quand le miroir a tourné d'un angle α pour venir en OM_2, l'image est en A'_2, et $OA = OA'_2$.



217. Rotation de l'image donnée par un miroir plan.

On en déduit : $OA'_1 = OA'_2$.

Si x est l'angle de rotation de l'image :

$$x = 2\hat{A}$$

(angle au centre) (angle inscrit)

Mais $\hat{A} = \alpha$, comme ayant leurs côtés perpendiculaires; on en déduit :

$$\boxed{x = 2\,\alpha.}$$

▶ *Quand un miroir plan tourne autour d'un axe situé dans son plan, l'image d'un point se déplace sur un cercle centré sur l'axe et passant par l'objet, dans le sens de rotation du miroir. L'angle de rotation de l'image est double de l'angle de rotation du miroir.*

■ **218. Rotation du rayon réfléchi.** — Reprenons le miroir précédent, et considérons un rayon incident SO, perpendiculaire à l'axe. Il se réfléchit en OR_1 (*fig. 218*), de façon que :

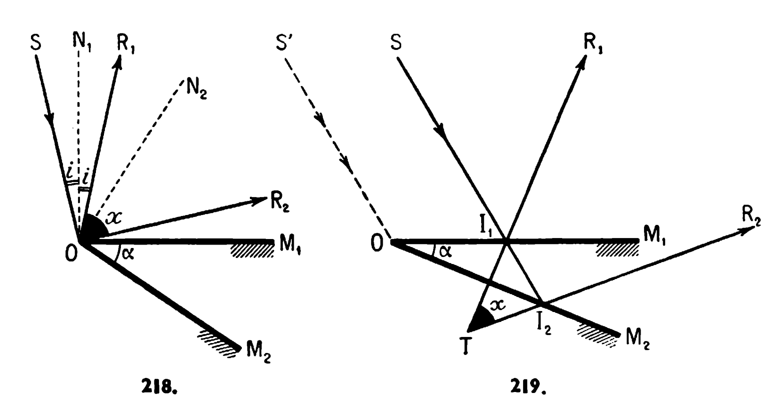
$$\widehat{SON_1} = \widehat{N_1OR_1} = i$$
$$\widehat{SOR_1} = 2i.$$

Quand le miroir a tourné de α pour venir de M_1 en M_2, SO étant fixe, il a entraîné sa normale qui a tourné aussi de α; le nouvel angle d'incidence est :

$$\widehat{SON_2} = i + \alpha,$$ et comme plus haut, on a :
$$\widehat{SOR_2} = 2\,(i + \alpha).$$

Le réfléchi a tourné de :

$$x = \widehat{SOR_2} - \widehat{SOR_1} = 2(i + \alpha) - 2i$$
$$x = 2\,\alpha.$$



218. **219.**

Rotation d'un rayon réfléchi sur un miroir plan tournant.

Supposons maintenant (*fig. 219*) que le rayon incident, toujours perpendiculaire à l'axe, ne tombe plus en O, mais en I_1; quand le miroir aura tourné de M_1 en M_2, le point d'incidence sera I_2, et le réfléchi aura passé de I_1R_1 en I_2R_2; il aura tourné de :

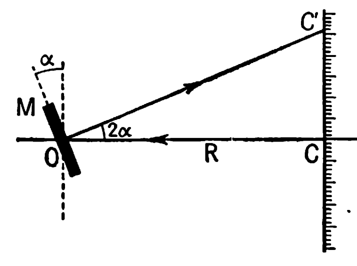
$$x = \widehat{R_1TR_2}.$$

Soit un rayon auxiliaire S′O parallèle à SI_1 et tombant sur l'axe : deux incidents parallèles restent toujours parallèles après réflexion; donc si le réfléchi de S′O tourne de 2α (cas précédent), il en sera de même du réfléchi de SI_1.

▶ *Quand un miroir plan tourne d'un angle α autour d'un axe situé dans son plan, le réfléchi d'un rayon incident orthogonal à l'axe tourne dans le même sens d'un angle double*

$$\boxed{x = 2\alpha.}$$

La méthode suivante, attribuée à Poggendorff, mais imaginée par Lord Kelvin, permet de mesurer les très petits angles et s'appuie sur la propriété précédente.

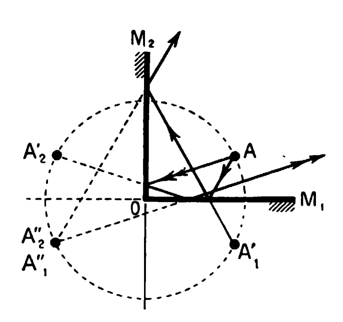


220. Méthode de Poggendorff.

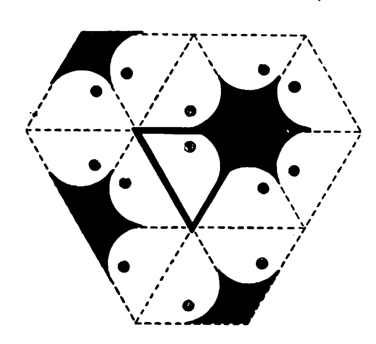
Un petit miroir M (*fig. 220*) fixé à l'axe de rotation O reçoit un pinceau lumineux étroit CO et le réfléchit sur une échelle graduée. Si l'axe tourne d'un angle α, les rayons réfléchis tournent d'un angle 2α et viennent sur la règle en C'. La mesure de CC' permet de calculer α, connaissant $OC = R$. On a :

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{CC'}{R}. \quad \text{Si l'angle } \alpha \text{ est très petit :} \quad \alpha = \frac{CC'}{2R}.$$

◇ **219. Combinaisons de miroirs.** — Si l'on place un objet devant deux miroirs, les images virtuelles données par l'un serviront d'objets réels pour l'autre, et ainsi de suite. On observe ainsi un très grand nombre d'images données par des miroirs plans parallèles : miroirs en regard dans un salon de coiffure, un café, un appartement, etc... Prenons, à titre d'exemple, la combinaison de deux miroirs plans rectangulaires (*fig. 221*). Un rayon issu de A se réfléchit sur M_1 comme s'il venait de A_1 (symétrique de A par rapport à M_1), puis



221. Miroirs rectangulaires.



222. Kaléidoscope.

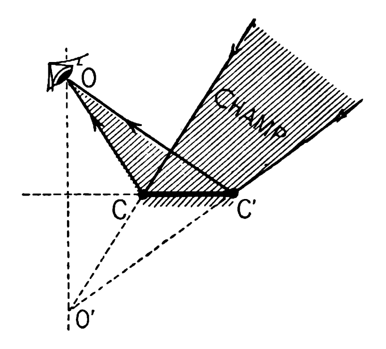
sur M_2 comme s'il venait de A''_2 (symétrique de A'_1 par rapport à M_2, A'_1 jouant le rôle d'objet par rapport à M_2). On voit que A''_2 étant dans l'angle opposé aux deux miroirs, le rayon semblant provenir de A''_2 ne rencontre plus aucun

miroir. Si l'on prend maintenant un rayon issu de A mais tombant d'abord sur M_2, on sera conduit aux images A'_2 et A''_1 ; cette dernière coïncidant avec A''_2, tous les points A étant évidemment aux sommets d'un rectangle. On obtient donc un nombre limité d'images, avec une image multiple $A''_1A''_2$ dans l'angle opposé à celui des miroirs. Le cas de miroirs à 60° (*fig.* 222), est utilisé dans le ***kaléidoscope*** : on dispose en général de 3 miroirs formant un prisme à base triangle équilatéral; la base du prisme, fortement éclairée, contient quelques petits objets colorés; ces objets et leurs images forment des rosaces du plus bel effet.

■ **220. Champ du miroir plan.** — Regardez une « glace »; vous voyez dans ce miroir une certaine étendue de l'espace, image d'une certaine région située devant le miroir : cette région constitue le champ du miroir.

▶ ***Définition.*** *On appelle champ d'un miroir la région de l'espace que l'on peut observer avec ce miroir.*

Continuez votre expérience et déplacez votre tête; d'autres images apparaîtront dans le miroir : le champ dépend de la position de l'œil de l'observateur.



223. Champ du miroir plan.

Soit un miroir plan (*fig.* 223) limité par sa monture CC′ (cadre, bordure, etc.) : c'est à l'intérieur de ce contour CC′ que regarde l'œil O. Or pour qu'un rayon pénètre dans l'œil, après réflexion, il suffit que l'incident correspondant se dirige sur O′, image de l'œil O dans le miroir : car si l'on considère O′ comme objet virtuel, les réfléchis passent par son image réelle O. On voit que le champ du miroir plan dépend de la position de l'œil, et est limité par un cône s'appuyant sur le contour du miroir et ayant pour sommet l'image de l'œil de l'observateur.

◀ RÉSUMÉ ▶

Lorsqu'un faisceau lumineux vient frapper une surface polie, une partie de la lumière est renvoyée par cette surface : c'est le phénomène de ***réflexion.***

Un miroir plan *est une surface plane réfléchissante.*

Le phénomène de réflexion obéit aux lois suivantes :

1° Le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale au point d'incidence sont dans un même plan.

2° L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

Un miroir plan donne d'un objet une image symétrique de l'objet par rapport au plan du miroir. Cette image a mêmes dimensions que l'objet mais ne lui est pas superposable. Si l'objet est ***réel*** *l'image est* ***virtuelle,*** *et inversement si l'objet est virtuel l'image est réelle.*

Quand un miroir plan tourne d'un angle α autour d'un axe situé dans son plan, l'image d'un objet, le rayon réfléchi correspondant à un incident donné, tournent autour du même axe, dans le même sens, d'un angle égal à 2α.

Cette propriété est utilisée pour la mesure des angles de rotation par la méthode de Poggendorff.

★ EXERCICES ★

175. — Votre visage est à 20 cm d'un miroir plan. A quelle distance voyez-vous votre image? Vous vous éloignez du miroir précédent de 5 cm. Dans quel sens se déplace votre image et de combien? — **Rép.** : *40 cm; l'image s'éloigne de 10 cm.*

176. — On prend deux points P et Q sur un rayon incident, et leurs symétriques P′ et Q′ par rapport au miroir. Montrer que P′Q′ donne la direction du réfléchi.

177. — Une glace de poche circulaire de 5 cm de diamètre est posée sur une table; à 10 cm au-dessus et sur son axe se trouve un point lumineux S. Calculer le diamètre de la tache lumineuse observée au plafond, à 2,5 m au-dessus de la table.
Rép. : *1,30 m.*

178. — Construire les images d'un point lumineux situé entre deux miroirs parallèles distants de 3 cm, et à 1 cm de l'un d'eux.

179. — Un pinceau de lumière parallèle tombe sur un petit miroir tournant et va faire une petite tache lumineuse (spot) sur un écran perpendiculaire au réfléchi et situé à 2 mètres du miroir. La tache se déplace de 2 mm. Calculer en minutes l'angle dont a tourné le miroir. — **Rép.** : *1′43″.*

180. — Vous êtes juste devant et à 1 mètre du milieu de la porte d'une armoire à glace large de 80 cm. De quel angle faut-il ouvrir l'armoire pour que votre image sorte de votre champ visuel?

181. — Votre œil est à 1,60 m au-dessus du sol; à quelle distance du sol doit se trouver le bas d'un miroir vertical pour que vous voyez juste vos pieds? Montrer que le résultat est indépendant de votre distance au miroir. — **Rép.** : *80 cm.*

182. — Un rayon lumineux tombe sur un système de deux miroirs plans faisant entre eux un angle α. Il subit deux réflexions successives; calculer l'angle du rayon incident avec le rayon deux fois réfléchi; montrer qu'il est indépendant de la direction du rayon incident.

183. — On envoie un faisceau de rayons parallèles au voisinage de l'arête d'un dièdre formé de deux miroirs ayant leurs faces réfléchissantes vers l'extérieur du dièdre; une partie de la lumière se réfléchit sur un miroir; l'autre partie sur le deuxième. On obtient ainsi deux faisceaux parallèles faisant entre eux un angle de 60°. Quel est l'angle du dièdre? — **Rép.** : *30°.*

184. — Une étoile, dans son mouvement diurne apparent, décrit un cercle autour de la ligne des pôles (axe du monde) en 24 heures sidérales. On reçoit la lumière provenant d'une étoile sur un miroir plan mobile autour d'un axe situé dans son plan et parallèle à l'axe du monde. Quelle doit être la vitesse de rotation du miroir pour que le faisceau réfléchi conserve une direction fixe?
Rép. : *1/2 tour en 24 heures.*

185. — Montrer que pour aller d'un point A à un point B après réflexion sur un miroir plan, la lumière suit le trajet le plus court.

186. — Deux miroirs plans font un angle de 45°; une sphère se trouve entre les deux miroirs à 30° de l'un d'eux. Figurer les images successives de la spère données par des réflexions multiples. Combien y en a-t-il? — **Rép.** : *7 images.*

187. — Trois miroirs plans forment un trièdre trirectangle. Trouver l'image d'un point A après des réflexions successives sur chacune des trois faces.

188. — Un rayon incident arrive sur le système précédent, se réfléchit successivement sur les 3 miroirs; comparer les directions du rayon réfléchi et du rayon incident.

LECTURE

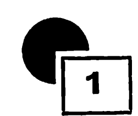
Les miroirs plans, d'un usage domestique courant, ne sont pas les seuls miroirs utilisés en optique. On emploie très souvent des calottes sphériques réfléchissantes, soit sur leur face concave (miroirs concaves), soit sur leur face convexe (miroirs convexes des rétroviseurs). Les propriétés de ces miroirs ne sont pas aussi simples que celles des miroirs plans. En particulier un miroir concave, recevant les rayons solaires les fait converger en formant une petite image réelle du soleil dans un plan appelé le plan focal du miroir. Cette propriété est utilisée dans les télescopes où des dispositifs permettent l'observation de ces images. Dans certains télescopes on utilise d'ailleurs des miroirs paraboliques.

Mais les miroirs ont été utilisés également pour concentrer l'énergie solaire en un four où on peut obtenir des températures de l'ordre de 3 500° à 4 000°. Dans une première installation à Meudon, le miroir était parabolique, de diamètre 2 mètres, donnant du soleil une image de 8,5 mm de diamètre. Le grand four solaire du Mont-Louis (Pyrénées-Orientales) comporte deux pièces essentielles : un miroir parabolique à facettes, de surface totale 90 m², recouvert de 3 500 glaces de faible épaisseur (1,5 mm), ce qui permet de les courber convenablement; un miroir plan de surface utile égale à 136 m² est orientable de façon à renvoyer dans une direction fixe (axe du miroir parabolique) la lumière qu'il reçoit du soleil, quelle que soit la position de celui-ci. Ce four est capable de fournir une puissance maximum de 75 kilowatts. Il existe un film documentaire fort intéressant sur ce sujet : on y voit une poutre d'acier portée à l'incandescence au foyer de four! et nous ne saurions trop conseiller à nos lecteurs de le demander à l'Institut National Pédagogique.

CHAPITRE XXIII

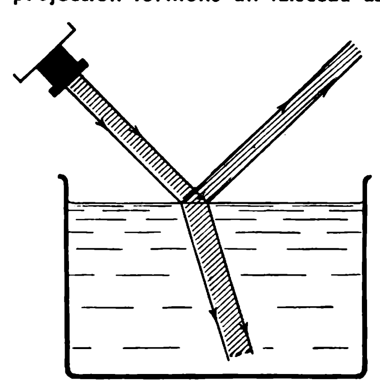
LOIS DE LA RÉFRACTION

1. Lois de Descartes.
2. Indices de réfraction.
3. Discussion; réflexion totale, réflexion partielle.
4. Expériences et applications.



LOIS DE DESCARTES

■ **221. Expérience fondamentale.** — A l'aide d'un appareil de projection formons un faisceau assez étroit de lumière parallèle, et dirigeons-le sur la surface de l'eau contenue dans une cuve de verre (*fig. 224*). On peut voir la marche du faisceau dans l'air si celui-ci contient un peu de poussière de craie, de fumée de tabac, etc. ou si on le coupe longitudinalement par un verre dépoli; on peut le suivre dans l'eau si celle-ci contient un peu de *fluorescéine*, qui s'illumine en vert au passage de la lumière.



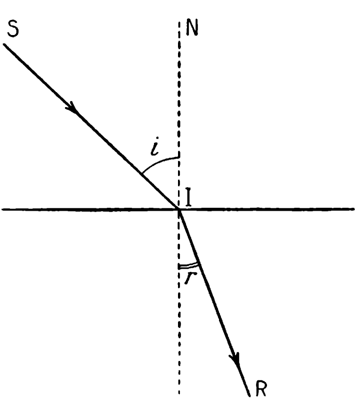
224. Réfraction et réflexion partielle.

Nous observons qu'une fraction de la lumière est réfléchie par le miroir plan constitué par la surface libre de l'eau : nous connaissons les lois de ce phénomène. Mais le reste de la lumière pénètre dans l'eau, en changeant de direction : c'est ce nouveau phénomène, appelé ***réfraction*** que nous allons édudier.

▶ ***Définition.*** *On appelle* ***réfraction*** *le brusque changement de direction que subit un rayon lumineux à la traversée de la surface de séparation de deux milieux.*

222. Les deux lois de Descartes. — Les définitions relatives au rayon incident (*fig. 225*) sont les mêmes que pour la réflexion; en particulier l'angle d'incidence i est l'angle que fait le rayon incident avec la normale IN au point d'incidence I; le plan d'incidence est le plan SIN.

Après avoir traversé la surface du dioptre, le rayon réfracté IR fait un angle r avec la normale en I : c'est ***l'angle de réfraction.*** Le plan NIR est le ***plan de réfraction.***



225. Lois de Descartes.

▶ ***1re loi.*** *Le rayon incident, la normale au point d'incidence et le rayon réfracté sont dans un même plan.*

Cette première loi est donc la même que la première loi de la réflexion; on peut dire aussi que le plan de réfraction est le même que le plan d'incidence. Les trois demi-droites IS, IN, IR ne forment pas un trièdre.

▶ ***2e loi.*** *Le sinus de l'angle d'incidence est dans un rapport constant avec le sinus de l'angle de réfraction.*

$$\sin i = n \sin r.$$

n s'appelle l'***indice de réfraction*** du second milieu par rapport au premier.

¶ **Remarque :** Cette dernière loi a été formulée par **Descartes** en 1637; auparavant, on utilisait la *loi de Képler* : $i = nr$. Cette dernière n'est à peu près satisfaisante que pour les petits angles, quand l'approximation que l'on tolère permet de confondre les angles avec leur sinus.

● EXEMPLES. — 1° *L'indice de l'eau par rapport à l'air étant $n = 4/3$, calculer l'angle de réfraction r pour une incidence de 60°.*

On peut écrire : $\sin 60 = \frac{4}{3} \sin r.$

soit : $\sin r = \frac{3\sqrt{3}}{8} = 0{,}65,$

Les tables donnent : $r = 40° \, 31'.$

La loi inexacte de Képler aurait donné :

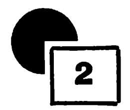
$$r = \frac{3}{4} i = 45°$$

2° *Quel doit être l'indice d'une substance par rapport à l'air pour qu'un rayon lumineux tombant sous l'incidence de 60° subisse une déviation de 15° ?*

L'angle de réfraction est alors : $r = 60° - 15° = 45°$ et la deuxième loi de Descartes nous donne :

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin 60°}{\sin 45°} = \frac{\sqrt{3}}{2} : \frac{\sqrt{2}}{2} = \sqrt{\frac{3}{2}}$$

$$n = 1{,}22.$$



INDICES DE RÉFRACTION

223. Indices absolus.

▶ ***Définition.** L'indice absolu N d'un milieu transparent est celui qui intervient quand le premier milieu est le vide.*

Par exemple, si de la lumière passe du vide dans le verre, c'est l'indice absolu du verre qu'il faudra utiliser dans la loi de la réfraction. Voici quelques valeurs :

SOLIDES		LIQUIDES	
Verre ordinaire	1,52	Eau	1,33
Verre baryté	1,57	Sulfure de carbone	1,63
Cristal	1,60	Alcool	1,36
Cristal lourd	1,96	Glycérine	1,47
Diamant	2,42	Benzine	1,50

Air = 1,0003 = 1

De ce tableau, retenons :

indice du verre : 3/2
indice de l'eau : 4/3.

La théorie ondulatoire a permis de donner à l'indice de réfraction une signification physique. Si $c = 300\,000$ km/s est la vitesse de la lumière dans le vide, la lumière est ralentie quand elle pénètre dans un autre milieu, où elle ne se propage plus qu'avec la vitesse $v < c$.

On démontre que : $N = \frac{c}{v}$.

● EXEMPLE. — *Calculer la vitesse de la lumière dans le diamant.*

Puisque l'indice absolu du diamant est N = 2,42, la vitesse cherchée v est : $v = \frac{c}{N} = \frac{300\,000}{2,42}$

soit $v = 124\,000$ km/s.

224. Indices relatifs. — Que va-t-il se passer si la lumière, au lieu d'aller du vide dans le verre, va de l'eau dans le verre ? Les lois de Descartes s'appliquent toujours, mais quelle valeur d'indice faudra-t-il prendre ?

Quand la lumière passe du vide dans le verre, l'indice de réfraction est $N = \frac{c}{v}$, rapport de la vitesse de la lumière dans le premier milieu à celle dans le second. Il en sera toujours ainsi. Dans l'eau (premier

milieu) la lumière se propage avec la vitesse $v_1 = \frac{c}{N_{eau}}$; dans le verre avec la vitesse $v_2 = \frac{c}{N_{verre}}$; l'indice relatif à utiliser est alors :

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_{verre}}{N_{eau}}. \quad \text{En général} \quad \boxed{n = \frac{N_2}{N_1}.}$$

▶ ***Loi.*** *L'indice relatif du deuxième milieu par rapport au premier est égal au quotient de l'indice absolu du deuxième milieu par celui du premier.*

● EXEMPLE. — *Quel est l'indice de réfraction du verre par rapport à l'eau?*

N_2 = indice absolu du verre = 3/2
N_1 = — de l'eau = 4/3

Indice relatif du verre par rapport à l'eau :

$$n = \frac{N_2}{N_1} = \frac{3 \times 3}{2 \times 4} = 1{,}125.$$

▶ ***Définition.*** *Quand l'indice absolu d'un milieu transparent est plus élevé que celui d'un autre, on dit que le premier milieu est plus réfringent que l'autre.*

Le verre $\left(n = \frac{3}{2}\right)$ est ainsi plus réfringent que l'eau $\left(n = \frac{4}{3}\right)$.

■ **225. Conséquences.** — L'indice de l'air étant 1,0003, il est pratiquement indifférent de confondre l'indice absolu ou l'indice par rapport à l'air.

La seconde loi de la réfraction peut aussi se formuler :

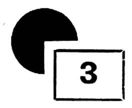
$$\sin i_1 = \frac{N_2}{N_1} \sin i_2, \quad \text{ou} \quad \boxed{N_1 \sin i_1 = N_2 \sin i_2.}$$

De cette forme symétrique, on peut déduire le ***Principe du retour inverse de la lumière*** : si, dans le milieu d'indice N_2, l'angle d'incidence est i_2, le rayon qui se réfractera dans le milieu d'indice N_1 fera l'angle i_1 avec la normale ou encore :

▶ *Les supports des rayons incidents et réfractés sont indépendants du sens de propagation de la lumière.*

Par exemple un rayon lumineux se propageant dans l'air arrive à la surface de l'eau sous un angle d'incidence i_1 égal à 30°; l'angle de réfraction est $i_2 = 22°$.

Si un rayon lumineux se propageant dans l'eau fait un angle d'incidence $i_2 = 22°$, il pénétrera dans l'air en faisant avec la normale l'angle $i_1 = 30°$.



DISCUSSION. — RÉFLEXION TOTALE RÉFLEXION PARTIELLE

226. La lumière pénètre d'un milieu moins réfringent dans un milieu plus réfringent. — Un rayon lumineux passe par exemple de l'air dans l'eau (*fig. 226*).

$$\sin i = n \sin r \qquad \text{avec} \qquad n = \frac{4}{3} > 1.$$

Il en résulte que $r < i$, et le réfracté se rapproche de la normale. Un rayon incident normal (S_1I), pour lequel $i = 0$, entrera sans déviation (IR_1) : $r = 0$. Un rayon quelconque S_2I pénétrera dans l'eau et prendra la direction IR_2 de façon que $r < i$; il se rapproche de la normale. Un rayon d'incidence rasante ($i = 90^\circ$), se rapproche de la normale, et fait avec celle-ci *l'**angle de réfraction limite*** : $\lambda < 90^\circ$. Il ne peut pas y avoir d'angles de réfraction supérieurs à l'angle limite. Dans ce cas, la deuxième loi de la réfraction s'écrit :

226. Réfraction limite.

$$\sin 90^\circ = n \sin \lambda$$

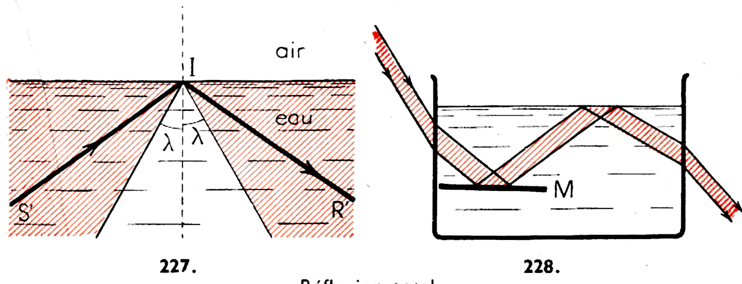
ou

$$\boxed{\sin \lambda = \frac{1}{n}.}$$

Par exemple si la lumière va de l'air dans le verre : $\lambda = 41^\circ 29'$; de l'air dans l'eau : $\lambda = 48^\circ 36'$; de l'eau dans le verre : $\lambda = 62^\circ 44'$.

227. La lumière pénètre d'un milieu plus réfringent dans un milieu moins réfringent. — Un rayon lumineux passe par exemple de l'eau dans l'air (*fig. 227*). Appliquons le principe du retour inverse aux rayons du paragraphe précédent. Nous voyons que les rayons allant (dans l'eau) au point I en faisant avec la normale un angle d'incidence inférieur ou égal à λ sortiront dans l'air avec un angle de réfraction compris entre 0° et 90° (émergence rasante). Les réfractés s'écartent de la normale.

▶ *Pour qu'un rayon puisse pénétrer dans le deuxième milieu, il faut que l'angle d'incidence soit inférieur ou égal à l'angle de réfraction limite.*



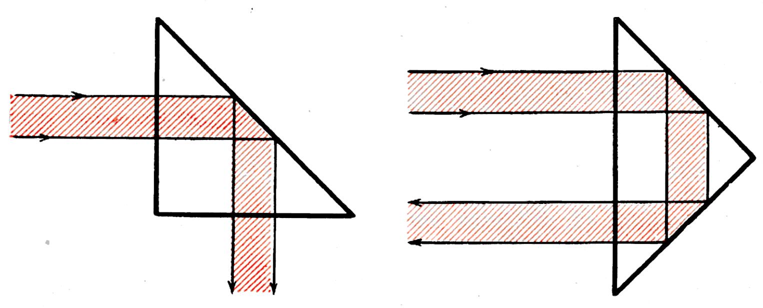
227. 228.
Réflexion totale.

Que va-t-il se passer pour des rayons tels que **S'**I, dont l'incidence est supérieure à l'angle limite, et qui ne peuvent se réfracter ? L'expérience montre que toute la lumière incidente est réfléchie au point I. On dit qu'il y a ***réflexion totale.***

Il ne faut pas oublier que si l'angle d'incidence est inférieur à l'angle limite, il y a toujours un rayon réfléchi (réflexion dite *vitreuse*), mais la plus grande partie de la lumière passe dans le rayon réfracté ; on dit qu'il y a ***réflexion partielle.*** Au moment où l'incidence approche de l'angle limite, la quantité de lumière réfléchie augmente brusquement, tandis que la quantité de lumière réfractée diminue d'autant ; quand l'incidence devient supérieure à l'angle limite, toute la lumière est réfléchie, et il n'y a plus de réfracté.

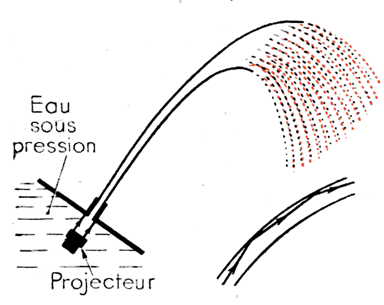
La *figure 228* montre une expérience simple ; selon l'inclinaison du miroir M, la lumière est dirigée vers la surface de l'eau avec des incidences variables ; elle peut soit sortir dans l'air lorsque le miroir l'envoie sur la surface de l'eau avec une incidence inférieure à λ, soit être réfléchie totalement dans le cas contraire comme l'indique la figure. L'eau contient de la fluorescéine pour que l'on puisse voir le trajet de la lumière.

■ **228. Prisme à réflexion totale.** — L'angle de réfraction limite pour le verre est inférieur à 45°. Soit un prisme de verre à base triangle rectangle isocèle (*fig. 229*), et un faisceau lumineux entrant normalement à l'une des faces rectangles. Il pénètre sans changer de direction, et tombe sur la face hypoténuse avec une incidence supérieure à λ ;



229. Une réflexion totale. **230.** Deux réflexions totales.

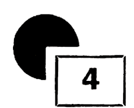
il y a réflexion totale et, de ce point de vue, le prisme est un excellent miroir plan. La lumière est renvoyée à angle droit de sa direction primitive. On peut aussi utiliser le prisme comme l'indique la *figure 230*; la lumière est renvoyée, après deux réflexions rectangulaires, dans la direction d'où elle vient. Ces prismes sont utilisés dans les jumelles à prismes et dans les périscopes.



231. Fontaine lumineuse.

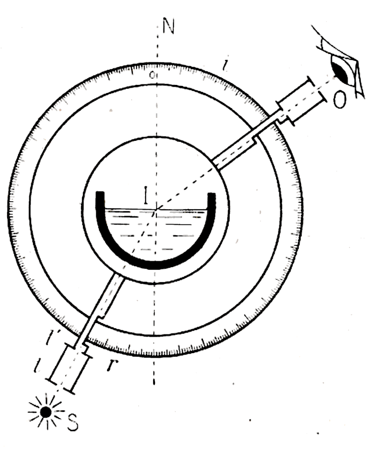
■ 229. Fontaines lumineuses. — *La figure 231* donne le principe des fontaines lumineuses. Une source de lumière intense (blanche ou colorée) éclaire le jet d'eau dans la direction où il sort du réservoir. Par suite de réflexions totales, la lumière ne peut sortir du jet, qui forme donc une sorte de tube canalisant la lumière. Mais quand le jet se brise en gouttelettes, celles-ci sont brillamment illuminées; c'est à cet endroit que la fontaine devient lumineuse.

De même, un tube de verre courbé « conduit » la lumière comme le jet liquide précédent. De tels dispositifs sont employés en chirurgie pour éclairer telle partie du corps inaccessible à un éclairage direct.



EXPÉRIENCES ET APPLICATIONS

■ 230. Vérifications expérimentales des lois de la réfraction. — *La figure 232* schématise l'appareil de *Silbermann*. Une cuvette demi-cylindrique à axe horizontal contient un liquide jusqu'au niveau de cet axe I. Centré sur cet axe, un cercle gradué vertical permet de lire les angles i et r à l'aide de deux alidades. L'une de celles-ci porte deux trous t et t' définissant un petit pinceau de lumière émis par une source S. Ce pinceau, se dirigeant vers l'axe du cylindre, pénètre normalement dans le liquide et continue sa marche sans réfraction (en ce point : $i = 0$, $r = 0$); il



232. Appareil de Silbermann.

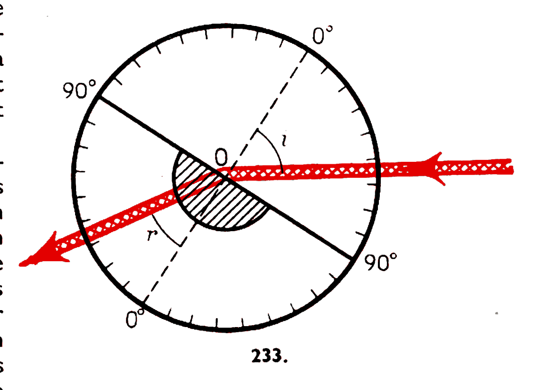
arrive en I et sort dans l'air en se réfractant; on repère la direction du pinceau émergent à l'aide de l'autre alidade, construite comme la première, en visant avec l'œil O.

Remarquons que le sens de la lumière n'a pas d'importance (principe du retour inverse). On fait plusieurs mesures de i, de r, et, pour chaque position, on calcule le quotient $\frac{\sin i}{\sin r}$; ce quotient reste bien constant et égal à la valeur de l'indice de réfraction du liquide.

Cet appareil a servi à la mesure des indices des liquides; on utilise maintenant des ***réfractomètres*** beaucoup plus précis.

Mais l'expérience n'est possible que lorsque l'angle r est inférieur à λ. On vérifie que pour $r = 41^\circ$ environ, le rayon sort en rasant la surface de l'eau (on trouverait une autre valeur de $r = \lambda$ pour un autre liquide). Si $r > \lambda$, il faut abaisser l'alidade de visée au-dessous de la surface du liquide pour retrouver la lumière qui a subi la réflexion totale, dont on vérifie également les lois.

On dispose actuellement d'appareils plus simples, permettant en classe une vérification rapide de la deuxième loi de Descartes. Ils sont constitués par des demi-cylindres en verre ou en plexiglass fixés sur un cercle gradué (*fig.* 233). On fait arriver un faisceau parallèle très étroit au centre du cercle qui est sur l'axe du cylindre; les traces des faisceaux incidents et réfractés sont visibles sur le cercle et on lit directement les valeurs des angles d'incidence et de réfraction. La vérification de la loi est facile mais moins précise qu'avec l'appareil précédent.



233.

◇ **231. Expérience de réflexion totale.** — Voici une expérience simple que chacun peut réaliser chez soi. On fait flotter sur l'eau d'un verre (*fig.* 234) une rondelle de liège coupée dans un bouchon, et dans laquelle on a piqué une épingle dont la tête plonge dans l'eau. On regarde au ras de la surface de l'eau, en réglant l'épingle jusqu'à ce que sa tête apparaisse, par réfraction, juste au bord de la rondelle de liège.

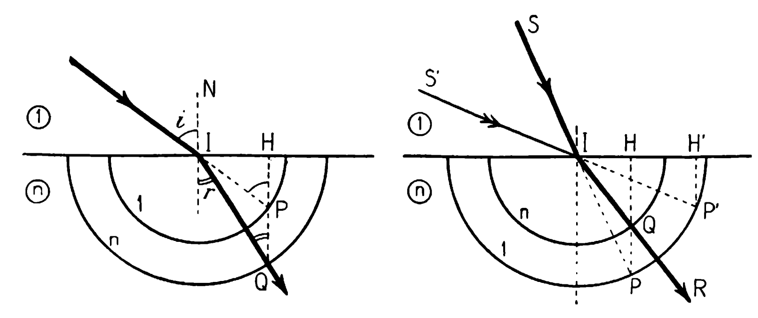
La figure montre que l'on a :

$$\sin \lambda = \frac{OA}{TA} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{TA}{OA}.$$

On retire le flotteur, on mesure TA et OA au double décimètre; on trouve n voisin de $\frac{4}{3}$.

234. Réflexion totale.



235. Le 2e milieu est plus réfringent. **236.** Le 2e milieu est moins réfringent.

■ **232. Construction du rayon réfracté.** — Soit un rayon incident venant de l'air sur de l'eau en I (*fig. 235*). Traçons de I comme centre un cercle de rayon 1 et un cercle de rayon n; prolongeons l'incident jusqu'au cercle de rayon 1 en P; abaissons la perpendiculaire PH sur la surface de séparation; elle coupe le cercle de rayon n en Q : IQ est le réfracté cherché. En effet, les angles i et r se retrouvant en P et Q comme alternes-internes, on peut écrire :

$$\text{IH} = \text{IP} \sin i = \text{IQ} \sin r,$$

soit

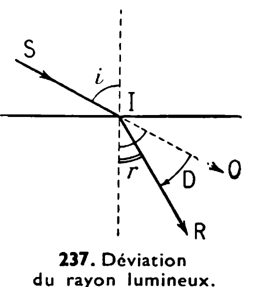
$$\sin i = n \sin r.$$

Si le premier milieu était plus réfringent que le second, la construction ne serait pas toujours possible (*fig. 236*), car cette fois l'indice du second milieu étant plus petit que celui du premier, le cercle de rayon n est intérieur à l'autre. Le rayon SIR se réfracte bien en s'écartant de la normale. Mais pour le rayon S′I, la perpendiculaire P′H′ ne coupe plus le cercle de rayon n; il y a réflexion totale. Il est d'ailleurs facile de construire l'angle λ de réfraction limite en se plaçant dans le cas de l'émergence rasante.

■ **233. Déviation du rayon lumineux.** — Un rayon SI (*fig. 237*) se réfracte en IR. Il se dirigeait primitivement suivant SIQ; il a donc tourné de l'angle QIR; cet angle est la déviation qu'il a subie.

Prenons comme sens positif sur le rayon le sens de propagation de la lumière.

▶ ***Définition.*** *La déviation est l'angle dont il faut faire tourner la direction positive du rayon incident pour l'amener sur la direction positive du rayon réfracté.*



237. Déviation du rayon lumineux.

La figure montre immédiatement que si l'on appelle D l'angle de déviation, on a :

$$\boxed{D = i - r.}$$

On démontre que la déviation croît constamment avec i; elle est nulle pour $i = 0$, et devient $90° - \lambda$ pour l'incidence rasante.

◀ RÉSUMÉ ▶

Lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu transparent dans un autre milieu transparent, sa direction est modifiée : il y a ***réfraction.***

La réfraction de la lumière obéit aux ***lois de Descartes :***
1° Le rayon incident, la normale au point d'incidence et le rayon réfracté sont dans un même plan.
2° Il existe un rapport constant entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction. Ce rapport est appelé ***l'indice n*** *du second milieu par rapport au premier.*

$$\sin i = n \sin r.$$

*L'****indice absolu*** N *est l'indice par rapport au vide.*
*L'****indice relatif*** *n d'un milieu 2 par rapport à un milieu 1 est égal au quotient de l'indice absolu du milieu 2 par l'indice absolu du milieu 1.*

$$n = \frac{N_2}{N_1}.$$

Si n est supérieur à 1 le rayon réfracté se rapproche de la normale : le deuxième milieu est ***plus réfringent*** *que le premier.*

Si n est inférieur à 1, le rayon réfracté s'écarte de la normale : le deuxième milieu est ***moins réfringent*** *que le premier. Si l'angle d'incidence dépasse une certaine valeur appelée angle limite, il n'y a plus de rayon réfracté : la lumière subit la* ***réflexion totale.***

La réfraction s'accompagne toujours d'une ***réflexion partielle.***
Au point d'incidence, le rayon lumineux subit une ***déviation :***

$$D = i - r.$$

★ EXERCICES ★

189. — Un rayon lumineux pénètre dans un milieu d'indice $n = 1{,}732$ (que l'on pourra prendre égal à $\sqrt{3}$). Calculer l'angle d'incidence sachant que le rayon réfracté fait un angle de 30° avec la normale. — **Rép.** : $i = 60°$.

190. — L'indice du second milieu est le double du premier; déterminer par la construction géométrique l'angle de réfraction limite et calculer sa valeur.

191. — Calculer l'angle de réfraction limite du diamant dont l'indice est 2,42. Que deviendrait cet angle si le diamant était plongé dans l'eau d'indice 4/3?
Rép. : $\lambda = 24°22'$; $\lambda' = 33°21'$.

192. — Quelle est la vitesse de la lumière dans le sulfure de carbone d'indice 1,63?

193. — On envisage le prisme à réflexion totale de la figure 229 : étudier ce qui se passe si la lumière n'arrive plus normalement sur la face d'entrée.

194. — De quel angle varie brusquement la direction de la lumière au moment du passage à la réflexion totale? Calculer les valeurs pour les réfractions : air-eau; air-verre; eau-verre. — **Rép.** : *$90^o - \lambda$ = 41°25′; 48°14′; 27°16′.*

195. — La cuve représentée par la figure 218 est parallélépipédique. L'angle d'incidence (et de réflexion) à la surface libre est de 60°. L'indice de l'eau est 4/3. Calculer l'angle d'incidence du rayon entrant par la paroi verticale, et l'angle d'émergence du rayon sortant par l'autre paroi verticale. On négligera l'influence des parois de verre de la cuve. On supposera le miroir plan M horizontal.

196. — Un rayon incident SI frappant une surface plane donne un réfléchi IR et un réfracté IR′. Calculer l'angle d'incidence de façon que le réfléchi IR et le réfracté IR′ soient perpendiculaires. On désignera par n l'indice du second milieu par rapport au premier. Application : $n = 1,52$. — **Rép.** : $tg\ i = n$; $i = 56°39′$.

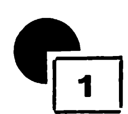
197. — Un rayon lumineux SI arrive en un point I d'une sphère de verre d'indice $n = 3/2$; il fait avec la normale à la sphère un angle $i = 60°$. Calculer l'angle de réfraction. Le rayon réfracté II′ rencontre de nouveau la sphère en I′; il donne naissance à un réfléchi I′I″ et à un réfracté I′R. Calculer les angle d'incidence, de réflexion et de réfraction en I′ ainsi que l'angle de déviation : angle de SI avec I′R. Même question pour les réflexions et réfractions au point I″.

198. — Un rayon lumineux incident SI se réfracte en I à la surface de séparation de l'air et de l'eau; l'angle d'incidence est 60°. Dans l'eau le rayon réfracté II′ rencontre un miroir plan dont le plan fait un angle α avec la surface du dioptre air-eau; il se réfléchit suivant I′I″ et rencontre en I″ le dioptre eau-air. Calculer l'angle α de façon que le rayon II″ subisse la réflexion totale en I″. Indice de l'eau : $n = 4,3$.
Rép. : $\alpha \geqslant 4°$.

CHAPITRE XXIV

DIOPTRE PLAN. LAMES À FACES PARALLÈLES

1. Images données par un dioptre plan.
2. *Marche d'un rayon dans une lame à faces parallèles.
3. *Images données par une lame à faces parallèles.



IMAGES DONNÉES PAR UN DIOPTRE PLAN

■ **234. Image d'un point réel.** — Un *dioptre* est un ensemble de deux milieux d'indices différents.

▶ ***Définition.*** *On appelle dioptre plan l'ensemble de deux milieux inégalement réfringents, séparés par une surface plane.*

L'air et l'eau, l'air et le verre séparés par une surface plane constituent des dioptres plans.

Soit par exemple un point lumineux A_1 situé à une profondeur p_1, dans un milieu d'indice n_1, l'autre milieu ayant pour indice n_2. Les rayons issus de A_1 (*fig. 238*) se réfractent et l'image A_2 de A_1 devra se trouver à l'intersection de deux réfractés quelconques. Le rayon d'incidence normale n'est pas dévié; A_2 est donc sur la normale A_1H au dioptre; il est aussi sur le prolongement (partie virtuelle) du réfracté IR. Or, dans les triangles rectangles A_1HI et A_2HI, on peut écrire :

238. Image donnée par un dioptre plan.

$$HI = HA_1 \times \text{tg}\, i_1 = HA_2 \times \text{tg}\, i_2.$$

Si on appelle p_2 la distance HA_2 de l'image au dioptre, il vient :

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\text{tg}\, i_1}{\text{tg}\, i_2} = \frac{\sin i_1}{\cos i_1} \times \frac{\cos i_2}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1} \times \frac{\cos i_2}{\cos i_1}.$$

Or le rapport des cosinus varie si celui des sinus est constant.

La valeur de p_2 dépend donc de l'angle d'incidence et les rayons issus de A_1 ne semblent pas tous provenir d'un même point A_2; il n'y a pas d'image de A_1 pour une incidence quelconque.

Plaçons-nous dans le cas d'une incidence faible : le point A_1 n'envoie sur le dioptre plan qu'un *pinceau lumineux* dont tous les rayons correspondent à une petite valeur de i_1 donc aussi de i_2; les cosinus restent alors très voisins de i (voir la table p. 328 : $\cos 8^o = 0{,}99 \simeq 1$ à $\frac{1}{100}$ près). On pourra donc écrire en faisant cette approximation :

$$\cos i_1 = \cos i_2 = 1 :$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{ou} \quad \frac{n_1}{p_1} = \frac{n_2}{p_2}$$

Il y a une assez bonne image de A_1 dans ces conditions dites *conditions de l'approximation de Gauss.*

▶ *Dans le cas de rayons peu inclinés sur la normale (approximation de Gauss) le dioptre plan donne d'un point objet réel une image virtuelle située sur la même normale au dioptre, telle que :*

$$\boxed{\frac{n_1}{p_1} = \frac{n_2}{p_2}.}$$

● EXEMPLE. — *Un enfant regarde verticalement le fond d'un bassin rempi d'eau, profond de 60 cm; à quelle distance de la surface voit-il ce fond?*

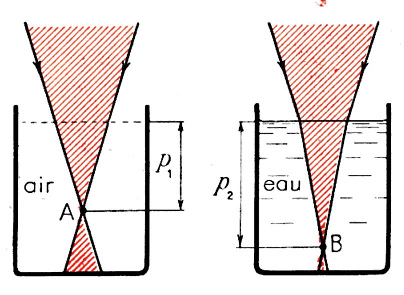
Il suffit d'appliquer la formule précédente, où l'on fait :

$n_1 = 4/3$ (eau), $n_2 = 1$ (air), et $p_1 = 60$ cm.

$$p_2 = \frac{n_2 p_1}{n_1} = \frac{3 \times 60}{4} \quad \text{ou} \quad p_2 = 45 \text{ cm.}$$

Le fond paraît relevé.

■ **235. Image d'un point virtuel.** — Les mêmes résultats s'appliquent. En effet, reprenons la même figure et changeons le sens de la lumière (principe du retour inverse); A_2 est objet virtuel, A_1 son image réelle dans les mêmes conditions que plus haut; la figure, les calculs et la formule qui en résulte sont tous les mêmes. Vérifions ce résultat expérimentalement. Formons à l'intérieur d'une cuve un faisceau convergent en A, et repérons la position de ce point (à l'aide d'un écran et d'un double décimètre) (*fig. 239*). Versons de l'eau fluorescéinée dans l'éprouvette; on voit le nouveau point de convergence B, plus bas que le précédent. On obtient :



239. Image d'un point virtuel.

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{4}{3}.$$

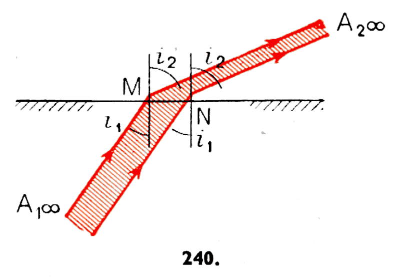
■ **236. Images d'un objet.** — Tout ce que nous venons de dire s'applique à tous les points lumineux d'un objet plan parallèle au dioptre. Chaque point image étant sur la même normale que le point objet correspondant, le grandissement est égal à + 1.

▶ *Le dioptre plan donne d'un objet réel une image virtuelle, et d'un objet virtuel une image réelle. Ces images sont droites, égales à l'objet, et leur position par rapport au dioptre est donnée par la formule :*

$$\frac{n_1}{p_1} = \frac{n_2}{p_2}.$$

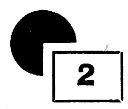
Remarquons que l'objet et l'image sont situés d'un même côté du dioptre, qu'ils sont de nature différente. Si l'objet est dans le milieu le plus réfringent, l'image est plus près de la surface du dioptre; si l'objet est dans le milieu le moins réfringent, c'est le contraire.

■ **237. Cas d'un point objet à l'infini.** — Ce point A_1 envoie sur le dioptre (*fig. 240*) un faisceau lumineux parallèle. Tous les rayons du faisceau faisant avec la normale au dioptre le même angle d'incidence i_1, les rayons réfractés feront avec cette normale, le même angle i_2 et seront ainsi parallèles entre eux. L'image A_2 est rejetée à l'infini mais dans une direction différente de celle de l'objet A_1; il y a eu déviation. Ce raisonnement ne suppose plus que les angles i_1 et i_2 soient faibles.



240.

▶ *Le dioptre plan donne d'un point objet à l'infini une image à l'infini dans une direction différente et ceci quelle que soit la valeur de l'angle d'incidence.*

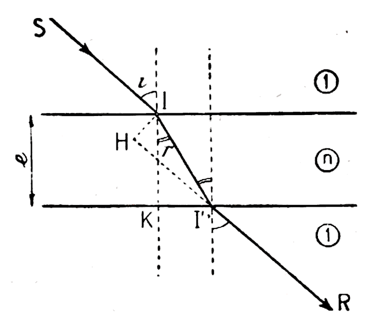


✶ MARCHE D'UN RAYON DANS UNE LAME À FACES PARALLÈLES

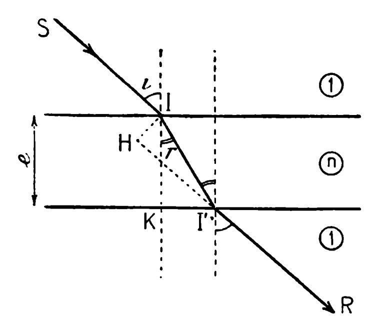
■ **238. Propriété fondamentale.** — Une cuve d'eau parallélépipédique, un cube de verre, une glace de vitrine, sont des exemples de lames à faces parallèles.

▶ ***Définition.*** *Une lame à faces parallèles est constituée par deux dioptres plans parallèles séparant un milieu transparent de deux milieux extrêmes supposés identiques.*

Soit une lame (*fig. 241*) d'épais-



241. Marche d'un rayon lumineux dans une lame à faces parallèles.



241. Marche d'un rayon lumineux dans une lame à faces parallèles.

seur e et d'indice n par rapport au milieu extérieur (lame de verre dans l'air par exemple). Un incident SI frappe un premier dioptre sous l'incidence i; il se réfracte avec un angle de réfraction r. Mais les dioptres étant parallèles, le réfracté II' tombe sur le second dioptre avec l'incidence r (angles alternes-internes par rapport aux normales qui sont parallèles); l'angle d'émergence est donc i. Le rayon émergent est donc parallèle au rayon incident.

▶ *La lame à faces parallèles ne dévie pas la lumière, qui la traverse sans changer de direction.*

■ **239. Translation latérale.** — Il reste cependant que le rayon sortant I'R est décalé de IH par rapport à l'incident SI, tout en lui restant parallèle. Dans des triangles rectangles évidents, on a :

$$II' = \frac{IK}{\cos r} = \frac{e}{\cos r}$$

et :

$$IH = II' \sin(i - r).$$

On en déduit :

$$IH = e\frac{\sin(i - r)}{\cos r}.$$

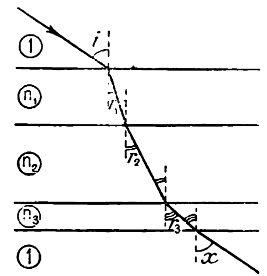
Si l'incidence est normale, le rayon ne subit aucune déviation, donc IH = 0. Si l'angle d'incidence est égal à 90°, l'angle de réfraction est égal à l'angle limite. La formule donne, avec $i = 90°$ $r = \lambda$.

$$IH = e\frac{\sin(90° - \lambda)}{\cos\lambda}.$$

C'est bien ce que l'expérience vérifie. La discussion complète montre que IH croît toujours de O à e.

◇ **240. Cas d'une pile de lames.** — Soit une pile de lames à faces parallèles (*fig.* 242) d'épaisseurs quelconques, d'indices différents, les milieux extrêmes étant identiques. Soit un rayon tombant sur la première lame sous une incidence i. Comment va-t-il sortir de l'ensemble? Nous supposons qu'il n'y a pas de réflexion totale en cours de route. A la traversée de chaque dioptre, on peut écrire :

$$\sin i = n_1 \sin r_1$$
$$n_1 \sin r_1 = n_2 \sin r_2$$
$$n_2 \sin r_2 = n_3 \sin r_3$$
$$n_3 \sin r_3 = \sin x.$$

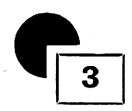


242. Cas de plusieurs lames.

Multiplions toutes ces relations membre à membre; il vient :

$$\sin i = \sin x$$
$$x = i.$$

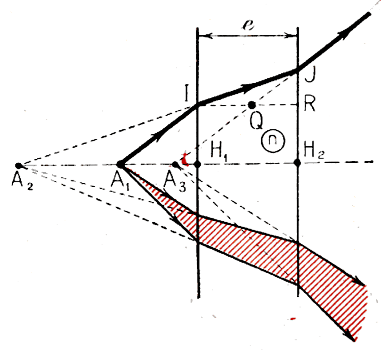
Donc cette pile de lames très différentes s'est comportée comme une lame unique.



✱ IMAGES DONNÉES PAR UNE LAME À FACES PARALLÈLES

■ **241. La lame est une suite de deux dioptres plans.** — Une lame à faces parallèles donnera nécessairement d'un objet une image droite et égale à l'objet; en effet, le premier dioptre donne de l'objet une telle image, qui elle-même joue le rôle d'objet pour le dioptre suivant.

■ **242. Calcul de la translation apparente.** — Le point objet réel A_1 (*fig. 243*) envoie sur la lame un rayon A_1I; le premier dioptre réfracte ce rayon comme s'il provenait de A_2, image virtuelle de A_1. Ce rayon tombe alors sur le deuxième dioptre en J et se réfracte comme s'il provenait de A_3, image de A_2 à travers ce dioptre de sortie, ou image de A_1 à travers toute la lame à faces parallèles.



243. Image donnée par une lame à faces parallèles.

Nous pourrions calculer $d = A_1A_3$ en appliquant successivement les formules des dioptres : l'image A_2 donnée par le premier jouant le rôle d'objet pour le second.

Mais on remarque plus facilement que, si l'on mène la normale IR commune aux deux dioptres :

A_1I et A_3J sont parallèles (déviation totale nulle).

A_1A_3 et IQ sont parallèles (normales à des plans parallèles).

Le quadrilatère A_1A_3IQ est donc un parallélogramme, etc :

$$d = A_1A_3 = IQ.$$

Or la construction montre que Q n'est autre que l'image de I donnée par le second dioptre. La formule $\frac{n_1}{p_1} = \frac{n_2}{p_2}$ s'écrit :

$$\frac{n}{IR} = \frac{1}{QR}.$$

En retranchant numérateurs et dénominateurs entre eux :

$$\frac{n}{\text{IR}} = \frac{n-1}{\text{IR}-\text{QR}}$$

$$\frac{n}{e} = \frac{n-1}{d}$$

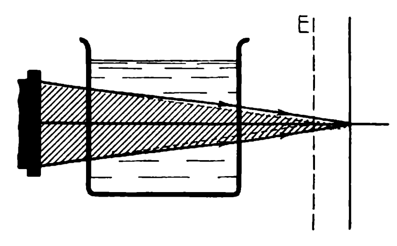
d'où

$$\boxed{d = e\left(1 - \frac{1}{n}\right).}$$

La figure montre que le déplacement apparent s'est effectué ***dans le sens de la lumière.*** Ce résultat est d'ailleurs général.

Si l'on applique le principe du retour inverse, A_3 est objet virtuel, A_1 est l'image définitive réelle. Le déplacement apparent a la même valeur et s'est effectué dans le sens de la lumière.

■ **243. Vérification expérimentale.** — Formons une image sur un écran E (*fig. 244*) à l'aide d'un appareil à projections, puis interceptons la lumière par un aquarium plein d'eau, de forme parallélépipédique. La première image joue maintenant le rôle d'objet virtuel pour l'eau de l'aquarium (nous négligeons les lames de verre), et on n'a plus rien de net sur l'écran. Pour mettre au point de nouveau, il faut éloigner l'écran de *d*, et ceci quelle que soit la position de l'aquarium.



244. Translation produite par une lame à faces parallèles.

Pour e = 24 cm on obtient *d* = 6 cm ce qui est conforme à :

$$d = e\left(1 - \frac{1}{n}\right) = 24\left(1 - \frac{3}{4}\right) = 6 \text{ cm}.$$

■ **244. Étude particulière d'une lame à faces parallèles de faible épaisseur.** — Ce cas est intéressant en pratique car il correspond aux glaces d'automobiles, de wagons de chemin de fer, de vitrines de magasin, etc... Les vitres ordinaires ne sont en général pas à faces parallèles : on s'en aperçoit facilement parce qu'elles déforment les objets par suite de leur courbure et de leur épaisseur variable.

Reprenons les résultats précédents : la translation latérale du rayon étant proportionnelle à l'épaisseur e, et celle-ci restant toujours très faible, on ne s'aperçoit pas de cette translation. Dans le cas de la vision normale, le déplacement apparent de l'objet est également très petit; il est tout à fait négligeable (quelques mm) vis-à-vis de la distance des objets regardés.

Mais chacun sait que la vision d'un objet à travers une glace reste nette même sous de fortes incidences; essayons de le comprendre. L'œil, diaphragmé par la pupille, ne reçoit d'un point lumineux objet qu'un pinceau dont chaque rayon ne subit qu'un faible déplacement latéral; ce déplacement varie très peu d'un rayon à l'autre du pinceau, puisque e est faible; les rayons réfractés semblent donc sensiblement

provenir d'un seul point, qui est l'image du point lumineux. Il en est ainsi pour tous les points de l'objet examiné à travers la glace, même sous diverses grandes incidences, et on observe une image nette, *pratiquement confondue en position et en grandeur avec l'objet observé.*

◀ RÉSUMÉ ▶

Dans le cas de rayons peu inclinés sur la normale le ***dioptre plan*** *donne d'un objet réel (virtuel) une image virtuelle (réelle), droite et de même grandeur que l'objet dont la position est définie par la formule :*

$$\boxed{\frac{n_1}{p_1} = \frac{n_2}{p_1}}$$ *(approximation de Gauss).*

D'un point objet à l'infini le dioptre plan donne une image à l'infini dans une autre direction et ceci quelle que soit l'incidence.

Une ***lame à faces parallèles*** *ne dévie pas la lumière, qui la traverse* ***sans changement de direction.*** *Elle donne d'un objet quelconque (dans l'approximation de Gauss) une image droite égale à l'objet; l'objet paraît ainsi subir un déplacement dans le sens de la lumière, donné par :*

$$\boxed{d = e\left(1 - \frac{1}{n}\right).}$$

Dans le cas d'une lame mince et d'un pinceau très étroit on obtient une bonne image, même sous de grandes incidences (vision à travers une glace sans tain).

★ EXERCICES ★

199. — Un pêcheur, dont l'œil est à 1,20 m au-dessus de l'eau, regarde verticalement un poisson situé à 60 cm au-dessous de la surface de l'eau. A quelle distance apparente le pêcheur voit-il le poisson? A quelle distance apparente le poisson voit-il le pêcheur? — **Rép.** : *165 cm; 220 cm.*

200. — Un parallélépipède de verre d'indice 1,5 a pour dimensions 5 cm; 6 cm; 8 cm. On le pose de toutes les façons possibles sur une feuille imprimée. De combien, dans chaque cas, les caractères paraissent-ils rapprochés?

201. — Un cube de verre d'indice 1,5 a 6 cm d'arête. On regarde par transparence un dessin collé sur une face. Quel est le déplacement apparent? — **Rép.** : *2 cm.*

202. — On regarde à travers une lame à faces parallèles un certain objet lumineux. Montrer que la position de l'image ne dépend pas de celle de la lame par rapport à l'œil.

203. — Une lame d'air à faces parallèles est comprise entre 2 lames de verre d'indice 1,5 de même épaisseur. Calculer, en fonction de l'angle d'incidence *i*, la translation latérale d'un rayon lumineux. Discuter.

204. — On reprend le même appareil et on observe normalement un objet. Calculer le déplacement apparent *d*; on prendra e = 4,5 cm. — **Rép.** : *3 cm.*

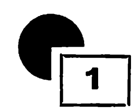
205. — Dans une éprouvette à pied on verse 12 cm d'eau, puis 10 cm de benzène. A quelle distance de la surface libre aperçoit-on le fond du vase? Indice absolu de l'eau 4/3; du benzène 3/2.

✗ **206.** — On étame la face postérieure d'une lame à faces parallèles d'épaisseur 2 cm et d'indice 3/2. Un objet est situé à 20 cm en avant de la glace ainsi formée. Indiquer la position des images successives de cet objet; l'une paraît plus brillante que les autres; préciser laquelle et indiquer sa distance à l'objet.

CHAPITRE XXV

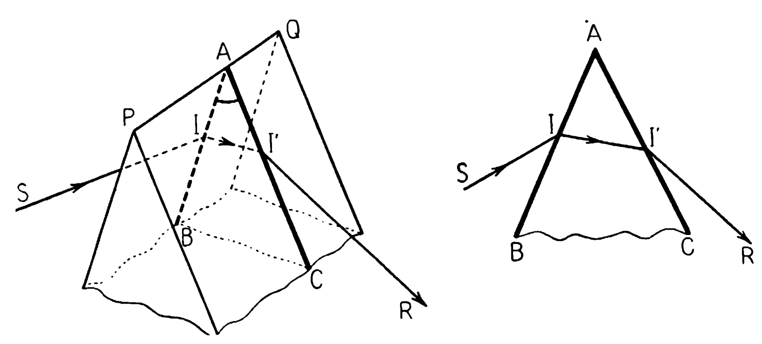
LE PRISME

DISPERSION DE LA LUMIÈRE BLANCHE



FORMULES DU PRISME

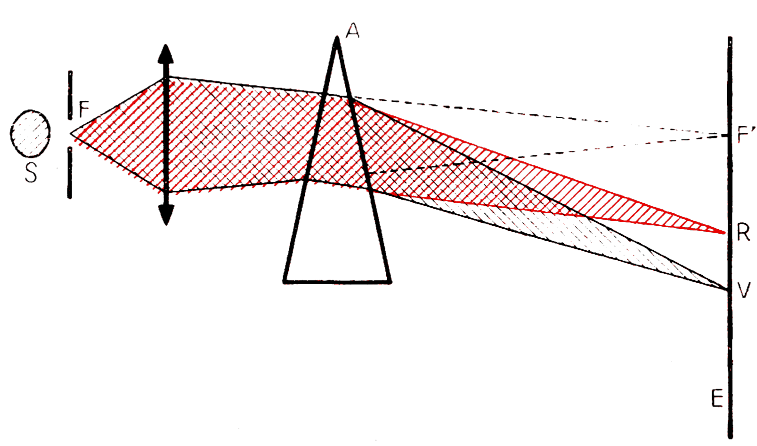
■ **245. Définitions.** — On appelle prisme, en optique, un milieu transparent limité par deux faces planes non parallèles (*fig. 245*).



245. Prisme et section principale.

Ces deux faces forment un dièdre; l'angle A du dièdre est l'*angle du prisme*; l'arête du dièdre est l'*arête du prisme*. On appelle *section principale* du prisme toute section perpendiculaire à l'arête : nous n'étudierons que les rayons se propageant dans un plan de section principale. La *base du prisme* est opposée à l'arête.

■ **246. Expérience fondamentale : déviation et dispersion.** — Éclairons une fente F (*fig. 246*) par de la *lumière blanche*, et, à l'aide d'une lentille convergente, formons une image réelle F′ de F. Interposons après la lentille un prisme A. Il n'y a plus d'image en F′ mais sur l'écran E, nous obtenons une infinité d'images de colorations variées allant du



246. Déviation et dispersion.

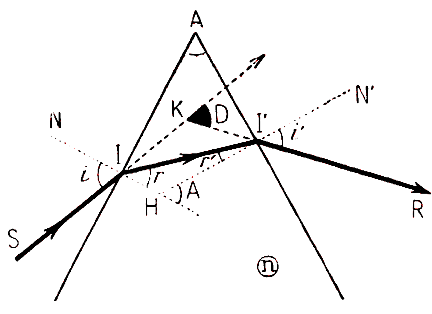
rouge au violet. Il s'est produit à la fois une ***déviation*** du faisceau et une ***dispersion*** de la lumière blanche. On appelle ainsi la décomposition de cette lumière par le prisme.

Intercalons entre la fente et la lentille un verre coloré, verre rouge par exemple : nous n'obtenons plus qu'une image nette, image rouge de la fente, décalée par rapport à F′. Seul le phénomène de déviation subsiste. Toute lumière qui n'est pas dispersée par le prisme est appelée une *lumière monochromatique* et, pour étudier la déviation par un prisme, nous nous placerons dans le cas d'une lumière monochromatique.

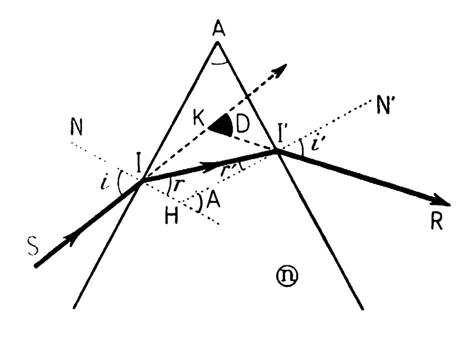
■ **247. Marche d'un rayon lumineux. Formules du prisme. —** Montrons que la déviation s'interprète au moyen des lois de Descartes. Considérons un rayon incident SI situé dans le plan de section principale; la normale IN (*fig. 247*) est dans ce plan, donc le rayon réfracté II′ reste dans ce plan d'après la première loi de Descartes. Si n est l'indice du prisme, on a la relation :

$$\sin i = n \sin r. \qquad (1)$$

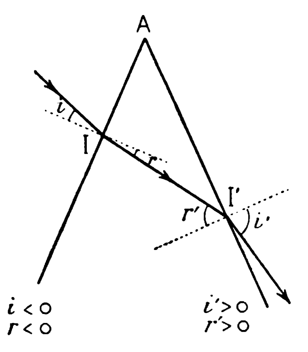
Le rayon II′, situé dans le plan de section principale, donne en I′ le rayon émergent I′R qui reste dans ce plan, puisque la normale I′N′ y est également. Ainsi le trajet du rayon lumineux est tout entier dans le plan de section principale que nous avons pris comme plan de figure dans la *figure 247*.



247. Marche d'un rayon lumineux dans un prisme.



247. Marche d'un rayon lumineux dans un prisme.



248. Convention de signes pour les angles.

Soit r' l'angle d'incidence sur le deuxième dioptre au point I', H le point de rencontre des deux normales IN et I'N'; dans le triangle II'H, l'angle extérieur en H est égal à l'angle A du prisme (côtés perpendiculaires) et il vaut d'autre part $r + r'$, d'où

$$r + r' = A. \qquad (2)$$

Si r' est inférieur à l'angle de réfraction limite, le rayon va sortir en s'écartant de la normale et en faisant avec elle un angle i', tel que :

$$\sin i' = n \sin r'. \qquad (3)$$

A la première réfraction en I, le rayon a été dévié dans le sens des aiguilles d'une montre de l'angle $i - r$; à la réfraction en I', il a subi une déviation dans le même sens égale à $i' - r'$. La déviation totale D vaut donc :

$$D = (i - r) + (i' - r')$$

soit :

$$D = i + i' - A \qquad (4)$$

¶ **Remarque :** On voit d'ailleurs que D, angle extérieur au triangle KII' est égal à la somme des angles intérieurs non adjacents qui valent $(i - r)$ en I et $(i' - r')$ en I'

Les relations (1) (2) (3) (4) constituent les formules du prisme.

$\sin i = n \sin r$	$\sin i' = n \sin r'$
$r + r' = A$	$D = i + i' - A.$

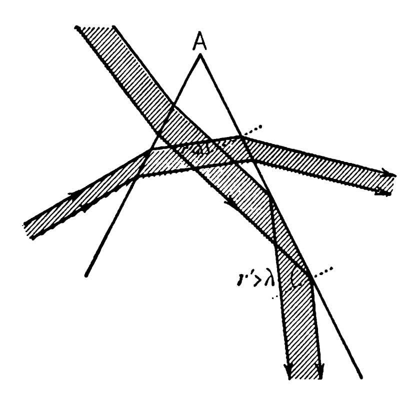
On montre que ces formules sont générales à condition de compter i et i' *positivement* si les rayons sont disposés comme dans la figure, et *négativement* quand le rayon correspondant est entre la normale et l'arête du prisme; on donne à r ou à r' le même signe qu'à i ou i' (*fig. 248*).

On vérifie également la proposition suivante :

▶ *Dans tous les cas, le rayon sortant est rabattu vers la base du prisme par rapport à sa direction d'entrée, si l'indice n est supérieur à* 1.

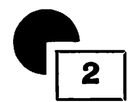
◇ **248. Condition d'émergence.** — Pour que le rayon I'R puisse sortir, il faut que $r' \leqslant \lambda$ (*fig. 249*). D'autre part : $r \leqslant \lambda$. La relation $A = r + r'$ donne donc :

$$A \leqslant 2\lambda.$$



249. Conditions d'émergence.

Donc, si un rayon émerge du prisme, l'angle du prisme est nécessairement inférieur à deux fois l'angle limite. Réciproquement, si cette condition est remplie, on peut toujours trouver au moins un incident qui traversera le prisme. Si $A = 2\lambda$, il n'y aura que le rayon d'incidence rasante pouvant traverser le prisme; il sortira d'ailleurs avec une émergence rasante ($i = 90^o$ donc $r = \lambda$; $r' = A - \lambda = \lambda$; donc $i' = 90^o$).



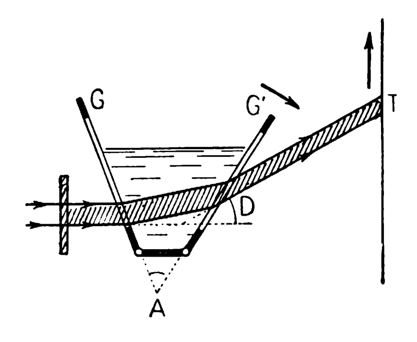
ÉTUDE DE LA DÉVIATION

Le prisme est défini par A et n; si on fait tomber un rayon sous l'incidence i, la déviation D est bien déterminée. Étudions l'influence de A, n, i sur D.

■ **249. Influence de l'angle du prisme sur la déviation, n et i étant constants.** — On dispose d'une cuve à faces mobiles (prisme à eau), contenant un liquide transparent d'indice n (*fig. 250*). Inclinons la glace d'entrée G de façon à fixer une valeur de i, et n'y touchons plus. Ouvrons alors la glace G' pour augmenter l'angle A du prisme; la tache lumineuse T s'élève constamment sur l'écran, puis disparaît au moment où la lumière se réfléchit totalement sur G'.

▶ *La déviation augmente quand l'angle du prisme augmente.*

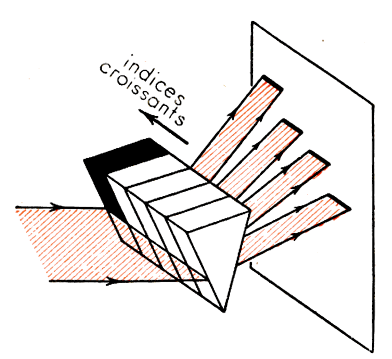
¶ **Remarque** : r est constant; si A augmente, r' augmente, puisque $r' = A - r$; donc i' augmente, et on sait qu'alors la déviation à la sortie ($i' - r'$) augmente (voir § *233*); la déviation à l'entrée ($i - r$) étant constante, la déviation totale $D = (i - r) + (i' - r')$ augmente.



250. Cuve à angle variable.

■ 250. Influence de l'indice du prisme sur la déviation, A et i étant constants.

— On dispose d'une pile de prismes de même angle et d'indices différents, disposés de façon que les faces soient respectivement dans un même plan. Envoyons sur ce *polyprisme* de la lumière sous l'incidence i; on constate sur l'écran (*fig. 251*) que la déviation est d'autant plus grande que l'indice est plus élevé.



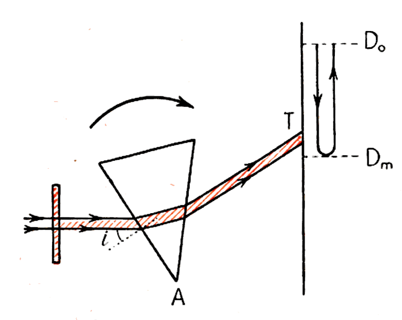
251. Déviation par un **polyprisme.**

▶ *La déviation augmente quand l'indice augmente.*

¶ **Remarque :** i étant constant, si n augmente, r diminue, puisque $\sin i = n \sin r$; donc r' augmente puisque $r' = A - r$; donc i' augmente, et par conséquent $D = i + i' - A$ augmente, i et A étant fixes.

■ 251. Influence de l'angle d'incidence sur la déviation, A et n étant constants.

— Faisons tomber de la lumière sur un prisme ordinaire (A et n constants); en faisant tourner le prisme (*fig. 252*) nous ferons varier l'angle d'incidence i; observons le déplacement de la tache lumineuse T sur un écran. En tournant le prisme régulièrement, *toujours dans le même sens*, nous voyons que la tache descend, semble s'arrêter, puis remonte; il y a donc eu un ***minimum de déviation*** D_m; d'autre part, la tache T disparaît, par suite de réflexion totale, pour une certaine valeur D_0.

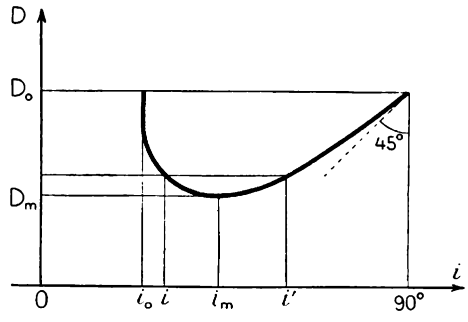


252. Variation de la déviation avec l'angle d'incidence.

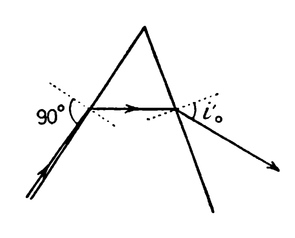
On constate de plus que, pour le minimum de déviation, le prisme est disposé symétriquement par rapport aux faisceaux incident et émergent.

▶ *Quand l'angle d'incidence varie, la déviation passe par un minimum; à ce moment $i = i'$, et le trajet de la lumière est symétrique par rapport au prisme.*

◇ **252. Courbe de déviation.** — Si l'on mesure les valeurs de la déviation D et celles de l'angle d'incidence i correspondant, on peut tracer la courbe représentée par la *figure 253*. On voit qu'à une même déviation correspondent deux incidences possibles; en effet, si i est l'angle d'incidence, i' l'angle d'émergence, le principe du retour inverse rend évident qu'à une incidence i' correspond une émergence i, et la déviation n'a pas changé. La lumière pénétrant sous l'incidence rasante émerge sous l'angle i'_0. Inversement la lumière pénétrant sous



253. Courbe de variation de la déviation avec l'incidence.



254. Rayon correspondant à l'incidence rasante.

l'incidence $i_0 = i'_0$, sort avec l'émergence rasante; les seuls rayons pouvant traverser le prisme ont donc une incidence telle que (*fig. 254*) :

$$i_0 \leqslant i \leqslant 90^o.$$

■ 253. Formules du prisme au minimum de déviation. — Dans ce cas $i = i'$, $r = r'$, les formules du prisme deviennent :

$$\sin i = n \sin r$$
$$2r = A$$
$$D_m = 2i - A.$$

En remplaçant i et r par leurs valeurs dans la première formule, on obtient :

$$\sin \frac{A + D_m}{2} = n \sin \frac{A}{2}$$

ou

$$\boxed{n = \frac{\sin \frac{A + D_m}{2}}{\sin \frac{A}{2}}.}$$

On utilise cette formule pour déterminer de façon précise l'indice d'un verre, lorsqu'on a mesuré au goniomètre A et D_m.

■ 254. Déviation pour un prisme de petit angle. — En expérimentant avec un prisme d'angle A petit, on constate que la déviation D reste faible et pratiquement constante si l'on ne s'écarte pas trop de l'incidence normale. Si i est petit, r l'est aussi, donc également r' puisque $r' = A - r$ (A et r sont petits); donc i' est aussi petit. La déviation : $D = i + i' - A$ est faible. La loi de Descartes peut être remplacée par la loi de Képler :

$$i = nr$$
$$i' = nr'$$

d'où :

$$i + i' = n(r + r') = nA.$$

On en tire :

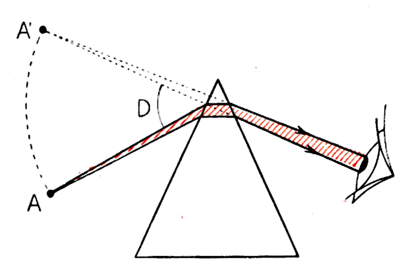
$$\boxed{D = (n - 1)\,A.}$$

¶ **Remarque :** D à peu près constant a la même valeur que D_m. On a :

$$n = \frac{\sin\frac{A + D_m}{2}}{\sin\frac{A}{2}} \simeq \frac{A + D_m}{A} = 1 + \frac{D_m}{A}, \qquad \text{d'où} \qquad D_m = (n - 1)\,A.$$

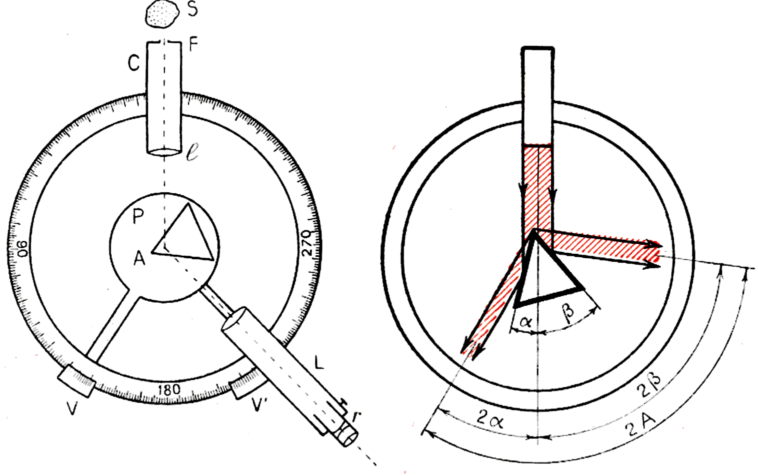
◇ **255. Vision d'un objet à travers un prisme.** — Si on examine un objet à travers un prisme (*fig. 255*) on constate que l'image virtuelle observée n'est bonne qu'au voisinage du minimum de déviation. Elle est simplement déviée, et se trouve à la même distance de l'arête que l'objet, quand les rayons passent près de l'arête. D'un objet virtuel, le prisme donnerait une image réelle dans les mêmes conditions (principe du retour inverse).

Remarquons que le prisme donne d'un point à l'infini une image à l'infini. Chaque rayon du faisceau parallèle émis par le point subit en effet la même déviation.



255. Vision à travers un prisme.

◇ **256. Le goniomètre; application à la mesure des indices.** — Le *goniomètre* de ***Babinet*** (*fig. 256*) se compose d'une plate-forme P sur laquelle on pose le prisme à étudier, son arête A bien verticale; la plate-forme peut tourner, en entraînant le prisme, et ses rotations sont lues sur un vernier V se déplaçant devant un cercle gradué en demi-degrés; le vernier étant au 1/30, on peut apprécier la minute. La lumière monochromatique, issue d'une source S, éclaire la fente F d'un collimateur; cette fente étant dans le plan focal objet



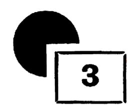
256. Goniomètre. **257.** Mesure de l'angle du prisme.

d'une lentille convergente l, la lumière tombant sur le prisme est parallèle; tous les angles i sont les mêmes; tous les angles i' sont les mêmes. La lumière parallèle sortante est reçue par une petite lunette astronomique L; on y verra nettement l'image de la fente F (qui pour la lunette est à l'infini) et on la pointera à l'aide du réticule r; un vernier V′ permet de mesurer les rotations de la lunette.

En manœuvrant convenablement le plateau P et la lunette, on peut construire de façon précise la courbe des déviations (*fig. 253*). Le goniomètre est principalement utilisé pour mesurer de façon précise l'indice de réfraction d'un verre dans lequel on aura taillé un prisme. En vue d'appliquer la formule :

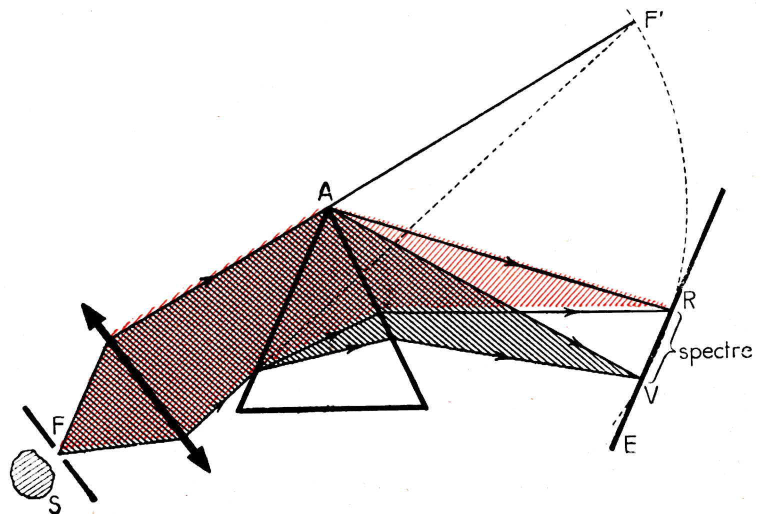
$$n = \frac{\sin \frac{A + D_m}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$$

on détermine D_m et A. Pour cette dernière mesure on reçoit la lumière du collimateur à cheval sur l'arête du prisme (*fig. 257*); une partie du faisceau est réfléchie par une face, l'autre partie par l'autre face. On vise chaque faisceau réfléchi à l'aide de la lunette. La figure montre que l'angle de ces deux faisceaux vaut 2A.



DISPERSION DE LA LUMIÈRE BLANCHE

■ 257. Le spectre de la lumière blanche. — Reprenons l'expérience fondamentale du § *246*. Éclairons une fente F (*fig. 258*) par de la lumière blanche, et, à l'aide d'une lentille convergente, formons une image



258. Production d'un **spectre**.

réelle F′ de F. Interposons après la lentille un prisme A; pour ce prisme, F′ joue le rôle d'objet virtuel, et l'image réelle finale peut être reçue sur un écran E. Mais en opérant en lumière blanche, on n'obtient pas une image nette de F. On observe un ***spectre,*** présentant toutes les couleurs de l'arc-en-ciel, du violet V au rouge R, où, selon la coutume, l'œil perçoit les tonalités :

violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.

Cela signifie que pour chaque couleur, le prisme a donné une déviation différente, donc a fonctionné avec un indice différent. Mais le spectre est continu; il faut admettre que si l'œil perçoit sept teintes (d'ailleurs plus ou moins bien définies) il y a une infinité de couleurs monochromatiques, à chacune desquelles correspond un indice bien défini.

▶ *La lumière blanche est formée d'une infinité de lumières monochromatiques; à chacune d'elles correspond un indice de réfraction bien déterminé.*

On constate également que le violet est le plus dévié, le rouge l'étant moins. Comme la déviation croît avec l'indice, on voit que :

▶ *L'indice de réfraction croît du rouge au violet.*

¶ **Remarque** : L'optique physique nous apprend que la longueur d'onde de la lumière est plus petite pour le violet ($\lambda = 0{,}4\ \mu$) que pour le rouge ($\lambda = 0{,}75\ \mu$). La théorie montre que, a et b étant des constantes :

$$n = a + \frac{b}{\lambda^2}.$$

Interposons, avant le prisme, un verre rouge : seule subsistera sur l'écran une image rouge de la fente, à l'endroit où se trouvait le rouge du spectre; interposons un verre orangé : on observera une image orangée de la fente, à l'endroit où se trouvait l'orangé du spectre, etc.

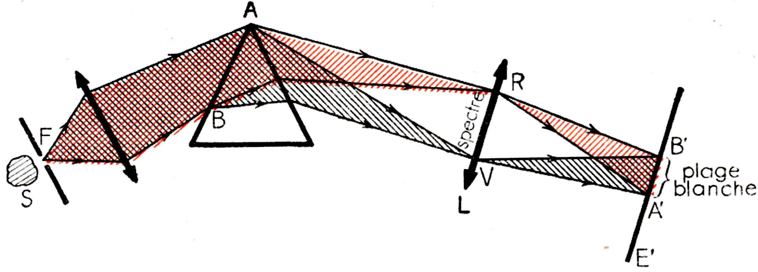
▶ *Un spectre pur est formé par une succession continue d'une infinité d'images monochromatiques de la fente.*

■ **258. Pouvoir dispersif.** — Tous les verres n'ont pas la même faculté de disperser la lumière, d'étaler le spectre. Si n_R est l'indice pour le rouge, n_V l'indice pour le violet, n l'indice moyen (1,5 pour le verre), le pouvoir dispersif est :

$$K = \frac{n_V - n_R}{n - 1}.$$

Il varie de 0,02 à 0,05 environ quand on passe du verre ordinaire (crown) au cristal (flint); un prisme de cristal donnera un spectre plus étalé qu'un prisme en verre ordinaire.

■ **259. Recomposition de la lumière blanche.** — A l'endroit où se forme le spectre, remplaçons l'écran par une lentille convergente E (*fig. 259*); elle donne quelque part une image A′B′ de la face d'entrée AB du prisme. Plaçons-y un écran E′ : on obtient une tache



259. Recomposition de la lumière blanche.

blanche. C'est évident puisque AB est éclairé en lumière blanche; d'autre part la lentille L recevant le spectre, a bien mélangé les couleurs du spectre en A'B'.

◇ **260. Couleurs complémentaires.** — Plaçons sur la lentille L une petite bande de papier de telle façon qu'elle soit éclairée en rouge; la tache A'B' est verte. Le vert et le rouge sont dites *couleurs complémentaires*. La couleur complémentaire d'une couleur C est la couleur C' qui, mélangée à C, donne de la lumière blanche.

■ **261. L'au-delà du spectre visible.** — L'œil n'est sensible que du rouge au violet. Mais au-delà du rouge, le spectre se continue en lumière invisible : c'est ***l'infra-rouge,*** capable d'échauffer un thermomètre; en deçà du violet, c'est ***l'ultra-violet,*** capable d'impressionner la plaque photographique.

◀ RÉSUMÉ ▶

Le ***prisme*** *est constitué par un milieu transparent limité par deux faces planes faisant entre elles l'angle du prisme. Le prisme fait subir à un faisceau incident de lumière blanche une* ***déviation*** *et une* ***dispersion.*** *La marche d'un rayon lumineux peut se déterminer de proche en proche par les formules du prisme qui donnent également la valeur de la déviation totale :*

$$\sin i = n \sin r$$
$$r + r' = A$$
$$\sin i' = n \sin r'$$
$$D = i + i' - A.$$

La déviation croît avec l'angle du prisme, ou avec l'indice, mais passe par un minimum quand on fait varier l'angle d'incidence.

Au ***minimum de déviation,*** *la lumière suit un trajet symétrique par rapport au prisme, et l'on a :*

$$n = \frac{\sin \frac{A + D_m}{2}}{\sin \frac{A}{2}}.$$

La déviation donnée par un ***prisme de petit angle*** *est pratiquement constante si l'angle d'incidence reste faible et égale à :*

$$D = (n - 1)A.$$

Pour chaque couleur composant la lumière blanche, le verre possède un indice particulier; un prisme déviera donc de façon différente des lumières de couleurs différentes : c'est le phénomène de ***dispersion*** *qui donne lieu à la formation des spectres lumineux.*

★ EXERCICES ★

207. — Un prisme d'angle 60° et d'indice 1,5 reçoit un rayon sous une incidence de 45°; calculer l'angle d'émergence i' ainsi que la déviation D.
Rép. : *52°23'; 37°23'.*

208. — Calculer pour le même prisme la valeur du minimum de déviation ainsi que la valeur de $i = i'$ correspondante. — **Rép.** : *37°12'; 48°36'.*

209. — Calculer l'angle A d'un prisme d'indice 1,5 pour que seul un rayon d'incidence rasante puisse traverser le prisme.

210. — Calculer l'indice de réfraction d'un prisme pour lequel $A = D_m = 60°$.
Rép. : *1,732.*

211. — La déviation donnée par un prisme de très petit angle est de 1°. Calculer l'angle de ce prisme sachant que son indice vaut 1,54. On donnera le résultat en degré et minute, ainsi qu'en radian.

212. — L'eau contenue dans un prisme à eau a pour indice 4/3. Un rayon lumineux entre normalement à l'une des faces. Jusqu'à quelle valeur de A peut-on ouvrir le prisme pour que la lumière puisse sortir par l'autre face? Calculer la déviation pour la position limite. — **Rép.** : *48°36'; 41°24'.*

213. — Un rayon lumineux frappe normalement la face d'un prisme d'angle 20° et d'indice 1,5. Il se réfléchit sur l'autre face qui est argentée, et ressort par la première face avec un angle d'émergence i'. Calculer i'.

214. — Un prisme de verre d'angle 60° et d'indice 1,5 est plongé dans l'eau d'indice 4/3. Calculer la valeur du minimum de déviation ainsi que l'angle d'incidence correspondant. Comparer les résultats à ceux de l'exercice 208.
Rép. : *8°28'; 34°14'.*

215. — On utilise une lame de verre dont les faces ne sont pas bien parallèles et dont on se propose de mesurer l'angle. Pour cela une source de lumière S émet un pinceau cylindrique qui fait une tache T sur un écran E. On interpose à 1 m de l'écran la lame à étudier, normalement au pinceau; la tache vient en T', et on mesure TT' = 3 mm. L'indice du verre étant 1,5, calculer en minutes l'angle du prisme constitué par les faces de la lame. — **Rép.** : *20'.*

216. Un prisme isocèle ABC, rectangle en A, a un indice égal à 1,52. On fait tomber normalement sur la face AB un faisceau de lumière parallèle. Montrer qu'il subit la réflexion totale sur BC. De quel angle faut-il faire tourner le faisceau incident pour qu'il y ait un faisceau émergent?

217. — Calculer les coefficients a et b de la formule : $n = a + \frac{b}{\lambda^2}$, où λ est exprimé en microns, sachant que pour un certain cristal :

$$n = 1{,}77 \text{ pour le rouge : } \lambda = 0{,}75\ \mu$$
$$n' = 1{,}84 \text{ pour le violet : } \lambda' = 0{,}40\ \mu.$$

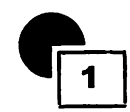
En déduire la valeur de l'indice pour la lumière jaune du sodium : $\lambda = 0{,}59\ \mu$.
Rép. : *$a = 1{,}743$; $b = 0{,}0156$; $n = 1{,}788$.*

218. — Calculer le pouvoir dispersif du verre précédent. On prendra pour indice moyen celui de la lumière jaune.

CHAPITRE XXVI

LENTILLES SPHÉRIQUES MINCES CONVERGENTES

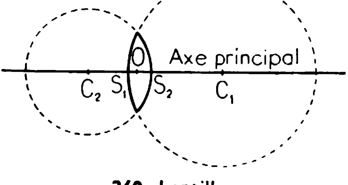
1. Étude expérimentale.
2. Formules des lentilles convergentes.



ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

■ **262. Définitions.** — Une lentille sphérique est un milieu transparent, en général du verre, limité par deux calottes sphériques ou une calotte sphérique et un plan. Nous n'étudierons que les *lentilles minces*; ce sont celles dont l'épaisseur est négligeable vis-à-vis de toute autre dimension telle que le rayon des sphères, la distance de l'objet à la lentille.

On appelle ***axe principal*** la droite joignant les deux centres C_1 et C_2 des faces sphériques ou la droite passant par le centre de la face sphérique et perpendiculaire à la face plane (*fig. 260*).



260. Lentille.

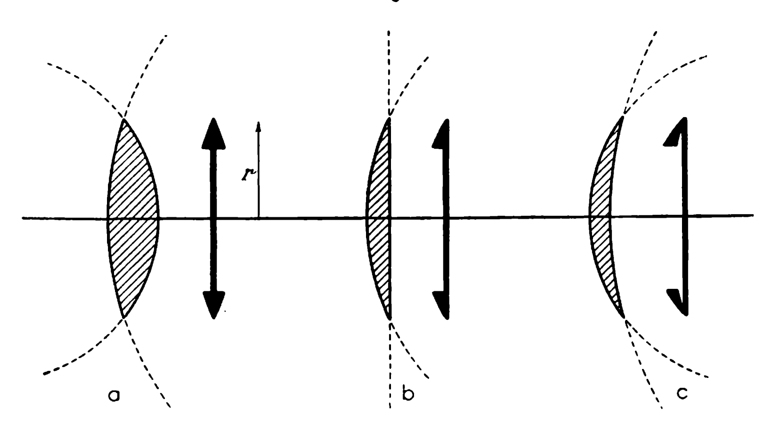
Le ***centre optique*** O est le point de rencontre de l'axe principal avec les deux dioptres limitant la lentille : l'épaisseur étant négligeable, les points S_1, S_2 sont confondus en O.

Les lentilles sont classées en deux catégories :

1° ***les lentilles à bord mince :*** elles sont limitées par deux sphères qui se coupent ou une sphère et un plan sécant (*fig. 261*). On distingue les *lentilles biconvexes* (*a*), les lentilles *plan convexes* (*b*) et les *ménisques* à bord mince (*c*).

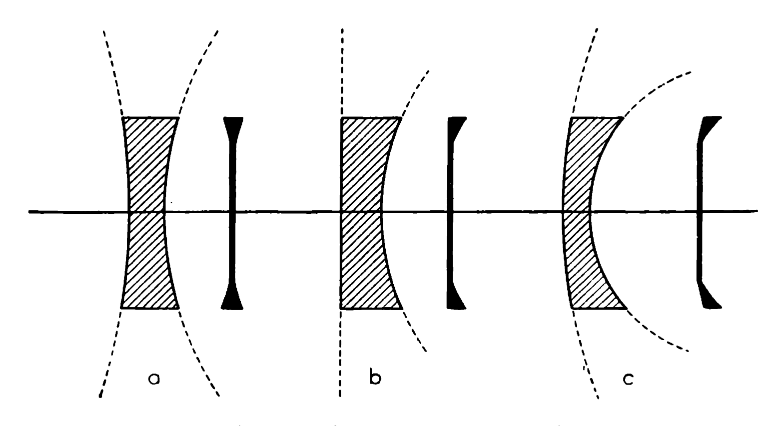
2° ***les lentilles à bords épais,*** limitées par deux sphères ne se coupant pas. La *figure 262* représente une lentille *biconcave* (*a*), une lentille *plan concave* (*b*), un *ménisque* à bord épais (*c*).

On schématise les lentilles par un segment de droite aux extrémités duquel des flèches indiquent le sens de la courbure des faces.



261. Lentilles **convergentes,** à bords **minces.**

Le *rayon d'ouverture r* d'une lentille est le rayon du cercle de bord de la lentille; il ne faut pas le confondre avec les rayons des sphères.

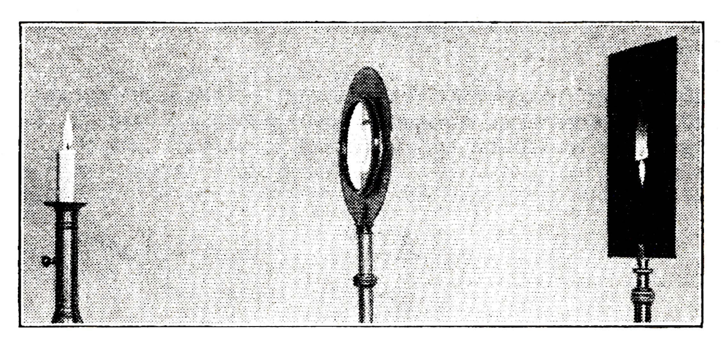


262. Lentilles **divergentes,** à bords **épais**

■ **263. Lentilles convergentes; lentilles divergentes.** — Faisons tomber un faisceau de rayons lumineux parallèles à l'axe principal sur l'une quelconque des lentilles précédentes. L'expérience montre que les lentilles à bord mince le transforment en un faisceau convergent, tandis que les lentilles à bord épais donnent à l'émergence un faisceau de lumière divergente. Pour cette raison les lentilles à bord mince sont appelées des lentilles ***convergentes;*** les lentilles à bord épais sont des lentilles ***divergentes.***

¶ **Remarque :** Nous supposons que les milieux qui baignent les faces d'entrée et de sortie de la lentille sont identiques et que l'indice relatif de la lentille par rapport au milieu extérieur est supérieur à l'unité.

■ **264. Obtention d'images nettes.** — Prenons une lentille convergente. Plaçons au voisinage de l'axe, assez loin de la lentille, une bougie (*fig 263*) : nous recueillons sur un écran une image réelle, renversée. Diaphragmons la lentille : l'image devient plus nette. Éloignons la bougie de l'axe principal, tout en diaphragmant la lentille; la netteté de l'image diminue. Prenons comme objet un ensemble de trois bou-



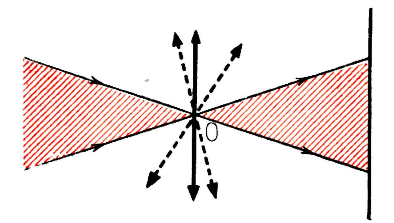
263. Image **réelle** donnée par une lentille convergente.

gies disposées dans un plan perpendiculaire à l'axe : si les bougies ne sont pas trop éloignées de l'axe, nous obtenons sur un écran plan normal à l'axe les trois images nettes.

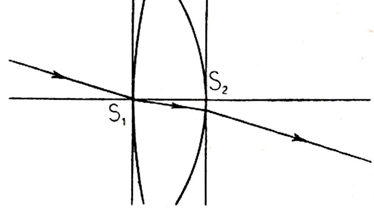
▶ *Une lentille convergente ne donne d'images nettes que si elle est diaphragmée, si l'objet est de petite dimension et se trouve au voisinage de l'axe. Dans ces conditions (approximation de Gauss), l'image d'un objet plan perpendiculaire à l'axe est plane et perpendiculaire à l'axe.*

¶ **Remarque :** Les mêmes conclusions sont valables pour une lentille divergente, mais elles sont moins faciles à vérifier en raison de la virtualité des images.

■ **265. Propriété du centre optique.** — Réalisons un faisceau convergent en un point O et observons la tache lumineuse qu'il produit sur un écran E (*fig. 264*). Plaçons en O le centre optique d'une lentille



264. Propriété du **centre optique.**



265. Le rayon tombant en S_1 subit une translation négligeable.

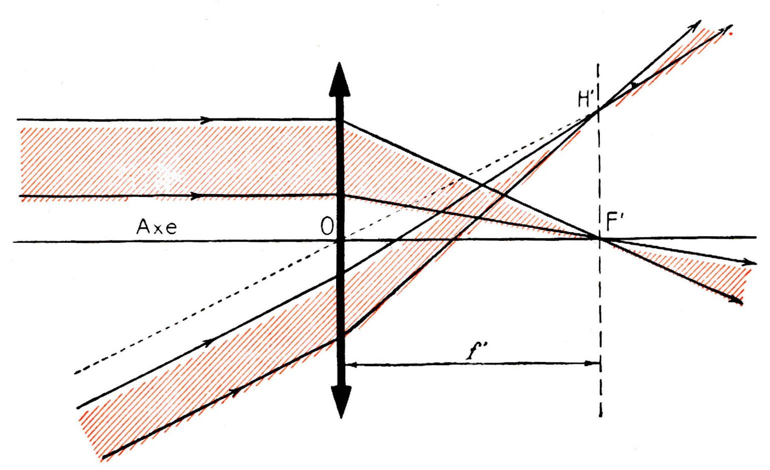
mince quelconque; quelle que soit l'orientation de la lentille, la tache lumineuse sur l'écran n'est pas modifiée. La marche des rayons lumi-

neux n'est donc pas changée et on peut énoncer la propriété suivante :

▶ *Tout rayon lumineux passant par le centre optique d'une lentille ne subit aucune déviation en traversant la lentille.*

¶ **Remarque :** Les deux plans tangents aux sphères en S_1 et S_2 (*fig. 265*) sont parallèles. Un rayon tombant en S_1 traverse la lame à faces parallèles S_1S_2 d'épaisseur négligeable : il en sort parallèlement à sa direction d'incidence et subit une translation négligeable.

■ **266. Foyer image. Plan focal image.** — Faisons arriver sur une lentille convergente un faisceau lumineux parallèle à l'axe (*fig. 266*) : la lentille le transforme en un faisceau convergent passant par un



266. Foyer image et plan focal image.

point F′ de l'axe, appelé ***foyer image***. La distance OF′ est la ***distance focale image f′ :*** il est facile de la mesurer. Retournons la lentille face pour face : F′ ne change pas non plus que la distance focale image.

▶ *Tout rayon incident parallèle à l'axe principal d'une lentille convergente donne naissance à un rayon émergent passant par le foyer image.*

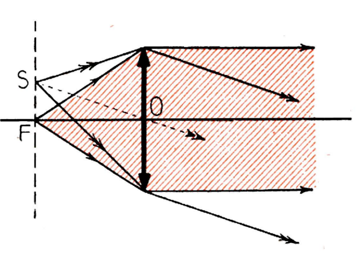
Le foyer image est donc l'image du point à l'infini situé sur l'axe principal.

Inclinons le faisceau parallèle de façon que ses rayons, toujours parallèles entre eux, ne soient plus parallèles à l'axe (*fig. 266*). Le faisceau émergent est toujours convergent, mais le point de convergence H′ se déplace, selon l'inclinaison (toujours faible), dans un plan perpendiculaire à l'axe passant par F′ : c'est *le plan focal image*. On obtient le point de convergence H′ en prenant l'intersection avec le plan focal image du rayon parallèle au faisceau incident mené par le centre optique O, puisqu'un tel rayon n'est pas dévié.

■ **267. Foyer objet. Plan focal objet.** — Déplaçons sur l'axe d'une lentille convergente (*fig. 267*) un point lumineux S : petit diaphragme fortement éclairé. Pour une position F déterminée de S, le faisceau sortant est parallèle à l'axe; F est le ***foyer objet***. La distance OF est la *distance focale objet f*. On constate qu'elle est égale à la distance focale image.

▶ *Tout rayon incident passant par le foyer objet donne naissance à un rayon émergent parallèle à l'axe.*

Le foyer objet est donc le point de l'axe dont l'image est rejetée à l'infini.



267. Foyer objet et plan focal objet.

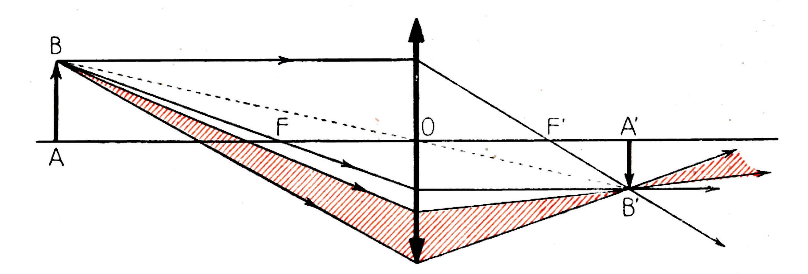
¶ **Remarque :** Si on retourne la lentille face pour face, la position du foyer objet ne change pas. Or, après retournement, le principe du retour inverse nous montre que le foyer objet devient foyer image; les deux distances focales sont donc égales.

Déplaçons la source S dans une petite portion de plan perpendiculaire à l'axe passant par le foyer objet F : le faisceau émergent reste un faisceau parallèle, mais il est incliné sur l'axe; il sort parallèlement à SO. Ce plan perpendiculaire à l'axe passant par le foyer objet F est appelé le *plan focal objet*.

▶ *Tout point lumineux S du plan focal objet a son image rejetée à l'infini dans la direction SO.*

▶ *Les deux plans focaux, objet et image, sont symétriques par rapport à la lentille.*

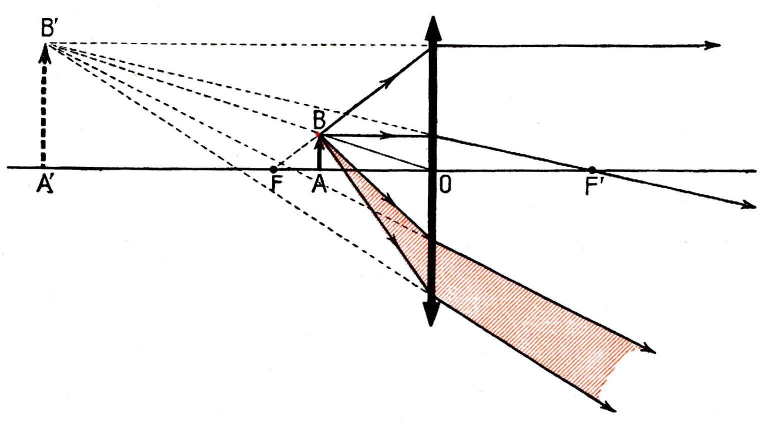
■ **268. Construction des images.** — L'expérience nous a montré que, dans les conditions de l'approximation de Gauss, l'image d'un



268. Construction de l'image **réelle** et marche d'un faisceau lumineux.

petit objet plan perpendiculaire à l'axe était plane et perpendiculaire à l'axe. Pour construire l'image d'un tel objet AB il suffit donc de construire l'image B′ du point B hors de l'axe. Nous utiliserons deux

rayons particuliers issus de B : le rayon parallèle à l'axe qui donne un émergent passant par F′ (*fig. 268*); le rayon incident BF qui émerge parallèlement à l'axe; les deux émergents se coupent en B′ image de B. On aurait pu prendre aussi le rayon BO qui ne subit aucune déviation; les points BOB′ sont alignés. Il suffit d'abaisser la perpendiculaire à l'axe B′A′ pour obtenir l'image de AB.



269. Construction de l'image **virtuelle** et marche d'un faisceau lumineux.

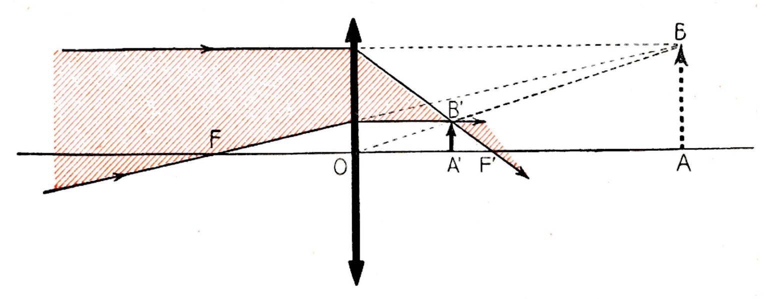
Les constructions analogues sont répétées sur la *figure 269* (image virtuelle correspondant à l'expérience de la *figure 270*) ainsi que sur la *figure 271* (AB est alors un objet virtuel et son image A′B′ est réelle).

270. Image **virtuelle.**

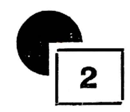
La marche d'un faisceau lumineux se figure sans difficulté.

On trace deux rayons du faisceau divergent ayant comme sommet le point B jusqu'à leur rencontre avec la lentille; on joint ces deux points de rencontre à l'image B′; on hachure enfin les parties réelles du faisceau.

Remarquez bien que dans le cas d'une image virtuelle le faisceau diverge du point B′, mais la lumière ne passe pas effectivement par ce point. Dans le cas d'un objet virtuel, le faisceau irait converger au point objet mais se trouve arrêté par la lentille; la lumière ne passe pas effectivement par ce point objet.

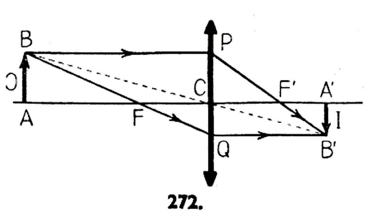


271. Construction de l'image et marche d'un faisceau lumineux dans le cas d'un objet **virtuel.**



FORMULES DES LENTILLES CONVERGENTES

■ **269. Formule de conjugaison.** — Reprenons la construction de l'image d'un objet AB perpendiculaire à l'axe (*fig.* 272). Soit p la distance de l'objet à la lentille, p' celle de l'image à la lentille. Désignons par O la grandeur de l'objet et par I celle de l'image. Les triangles rectangles semblables BQP et FQC donnent, en comptant positivement de bas en haut les segments perpendiculaires à l'axe :



272.

$$\frac{\overline{QC}}{\overline{QP}} = \frac{\overline{FC}}{\overline{BP}} \quad \text{soit :} \quad \frac{-\mathrm{I}}{-\mathrm{I} + \mathrm{O}} = \frac{f}{p}. \qquad (1)$$

Les triangles rectangles semblables PB'Q et PF'C donnent :

$$\frac{\overline{CP}}{\overline{QP}} = \frac{\overline{CF'}}{\overline{QB'}} \quad \text{soit :} \quad \frac{\mathrm{O}}{-\mathrm{I} + \mathrm{O}} = \frac{f}{p'}. \qquad (2)$$

Ajoutons membre à membre les relations (1) et (2); on obtient :

$$\frac{-\mathrm{I} + \mathrm{O}}{-\mathrm{I} + \mathrm{O}} = \frac{f}{p} + \frac{f}{p'}$$

soit :

$$\boxed{\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}} \qquad \text{(formule de Descartes).}$$

Cette formule est valable dans tous les cas de figure, à condition de compter :

p { ***positif si l'objet est réel*** / ***négatif — virtuel***

p' { ***positif si l'image est réelle*** / ***négatif — virtuelle.***

● EXEMPLE. — *Un objet réel perpendiculaire à l'axe est à 18 cm d'une lentille mince convergente de 12 cm de distance focale. Déterminer la nature et la position de l'image.*

Ici $p = +18$ et $f = 12$. La formule donne :

$$\frac{1}{18} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{12} \qquad \frac{1}{p'} = \frac{1}{12} - \frac{1}{18} = \frac{1}{36}$$

$$p' = +36 \text{ cm}.$$

L'image est donc réelle, à **36 cm** de la lentille.

■ **270. Formule du grandissement.** — Faisons le rapport membre à membre des relations (1) et (2) :

$$\frac{-\mathrm{I}}{\mathrm{O}} = \frac{p'}{p} \qquad \text{soit :} \qquad \boxed{\gamma = -\frac{p'}{p}.}$$

γ positif indiquera que l'image est droite, 0 négatif indiquera que l'image est renversée.

● EXEMPLE. — *Dans l'exemple précédent, l'objet avait 2 cm de hauteur. Trouver la grandeur de l'image.*

Nous avions : $p = +18 \qquad p' = +36.$

$\gamma = -\frac{36}{18} = -2$. L'image est donc renversée, et 2 fois plus grande que l'objet elle mesure 4 cm.

◇ **271. Autres expressions des formules.** — Repérons les positions de l'objet et de l'image par les segments $\overline{CA}$ et $\overline{CA'}$. Si nous choisissons comme *sens positif le sens de la lumière*, $\overline{CA}$ sera positif pour un objet virtuel, négatif pour un objet réel :

$$p = -\overline{CA}.$$

On voit de même que : $p' = +\overline{CA'}$.

Les formules peuvent donc s'écrire :

$$\boxed{-\frac{1}{\overline{CA}} + \frac{1}{\overline{CA'}} = \frac{1}{\overline{CF'}}} \qquad \boxed{\gamma = \frac{\overline{CA'}}{\overline{CA}}}$$

Cette notation peut rendre des services lorsque dans un problème on peut être conduit à utiliser les formules de Chasles, par exemple dans le cas de plusieurs lentilles successives.

■ **272. Discussion.** — La formule de conjugaison ne change pas si on y permute p et p' : cela traduit le principe du retour inverse de la lumière.

La somme $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$ doit rester constante; donc si p augmente, p' diminue.

▶ *Dans une lentille, l'objet et l'image se déplacent toujours dans le même sens.*

La formule du grandissement est à peu près évidente; les points B et B′ sont alignés avec le centre optique C; les triangles ABC et A′B′C′ sont semblables, le rapport d'homothétie ayant pour valeur absolue $\frac{p'}{p}$ ou $\frac{A'B'}{AB}$,

Dans le cas particulier où $p = 2f$, les formules donnent $p' = 2f$ et $\gamma = -1$. Un objet réel situé à une distance de la lentille égale au double de la distance focale a une image réelle, renversée égale à l'objet et située au double de la distance focale. La distance de l'objet à l'image est alors $4f$; on démontre qu'elle est alors minimum, pour les objets réels et leurs images réelles.

¶ **Remarque :** Les formules de conjugaison et de grandissement se vérifient aisément par l'expérience dans le cas d'une image réelle.

◇ **273. Formules de Newton.** — Repérons la position de l'objet par rapport au foyer objet F, et celle de l'image par rapport au foyer image F′ :

$$\overline{FA} = z \qquad \overline{F'A'} = z'.$$

Remarquons que nous avons ici une origine double : le foyer objet pour l'objet, et le foyer image pour l'image. Convenons de compter z et z′ algébriquement, en prenant pour sens positif celui de la lumière. Les valeurs algébriques de z et de z′ permettront de voir sur la figure s'il s'agit d'un objet ou d'une image réels ou virtuels.

Les triangles semblables ABF et QCF donnent :

$$\frac{\overline{QC}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{CF}}{\overline{FA}} \qquad \text{soit :} \qquad \frac{-I}{O} = \frac{f}{z}.$$

Les triangles semblables A′B′F′ et CPF′ donnent en désignant par f' la distance focale image CF′.

$$\frac{\overline{B'A'}}{\overline{CP}} = \frac{\overline{F'A'}}{\overline{CF'}} \qquad \text{soit :} \qquad \frac{-I}{O} = \frac{z'}{f'}$$

$$\boxed{\gamma = -\frac{f}{z} = -\frac{z'}{f'}.}$$

Il en résulte la relation de conjugaison : $zz' = ff'$; mais $f' = -f$, ce qui donne :

$$\boxed{zz' = -f'^2.}$$

Ces formules permettent d'obtenir le grandissement connaissant par exemple la position de l'objet sans avoir à calculer la position de l'image.

● EXEMPLE. — *Traiter les deux exemples précédents par les formules de Newton.*

La position de l'objet est déterminée par :

$$z = -(18 - 12) = -6 \text{ cm} \qquad \text{avec} \qquad f' = 12 \text{ cm}.$$

$zz' = -f'^2$ donne :

$$z' = \frac{-144}{-6} = +24 \text{ cm},$$

ce qui correspond bien à :

$$p' = f' + z' = 12 + 24 = 36 \text{ cm}.$$

Le grandissement est donné par :

$$\gamma = -\frac{f}{z} = -\frac{-12}{-6} = -2$$

ou par :

$$\gamma = -\frac{z'}{f'} = -\frac{24}{12} = -2.$$

Notons qu'en utilisant les segments, les formules de Newton s'écrivent :

$$\boxed{\overline{FA} \times \overline{F'A'} = -\overline{CF'}^2}$$

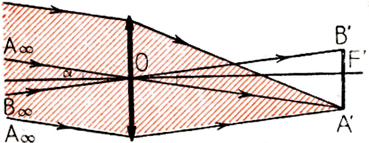
$$\boxed{\gamma = -\frac{\overline{CF}}{\overline{CA}} = -\frac{\overline{CA'}}{\overline{CF'}}}$$

274. Cas particulier d'un objet à l'infini. — L'image se fait dans le plan focal image. Dirigeons l'axe d'une lentille convergente vers le soleil dont les bords supérieurs et inférieurs sont A_∞ B_∞ (*fig. 273*). Le bord supérieur du soleil A_∞ envoie sur toute la lentille un faisceau cylindrique qui donne un faisceau convergent en un point A′ du plan focal, intersection du plan focal avec le rayon parallèle au faisceau incident et passant par O.

Soit α le diamètre apparent de l'objet : $\alpha = \widehat{A_\infty O B_\infty}$. Il est nécessairement petit (approximation de Gauss); on peut assimiler la corde A′B′ à l'arc de cercle de centre O et on a :

$$\boxed{A'B' = f' \times \alpha.}$$

α étant exprimé en radians.



273. Image d'un **objet à l'infini.**

● EXEMPLE. — *L'objectif de la lunette astronomique de Nice a 18 m de distance focale. Calculer le diamètre de l'image focale du soleil, dont le diamètre apparent est de 30′.*

On sait que $1' = \frac{3}{10\,000}$ radian.

Le diamètre apparent du soleil vaut : $\frac{30 \times 3}{10\,000} = \frac{9}{1\,000}$ radian. Le diamètre cherché vaut :

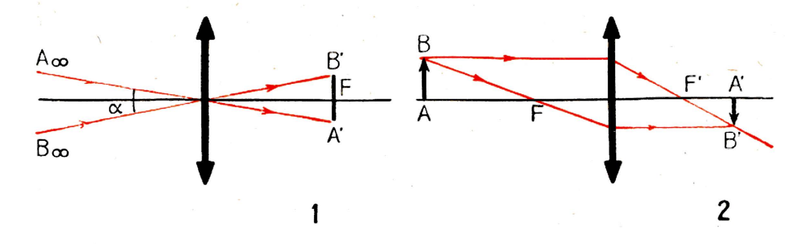
$$A'B' = 1\,800 \times \frac{9}{1\,000} = 16{,}2 \text{ cm}.$$

275. Positions relatives de l'objet et de l'image. — En appliquant les constructions rappelées sur la *figure 274* de la *page 237* ou les formules, on arrive aux résultats de la *page 238*.

Il ressort du tableau de la page 238 et de la figure 274 un résultat important :

▶ *Une lentille convergente donne toujours une image réelle sauf quand l'objet réel est situé entre le foyer objet et la lentille.*

On utilise les lentilles convergentes dans tous les instruments d'optique. Elles interviennent en effet dans la construction des objectifs de lunettes, de microscopes, des objectifs photographiques ou encore des oculaires, mais rarement seules. Nous verrons que le cas de l'image virtuelle est utilisé dans la loupe.

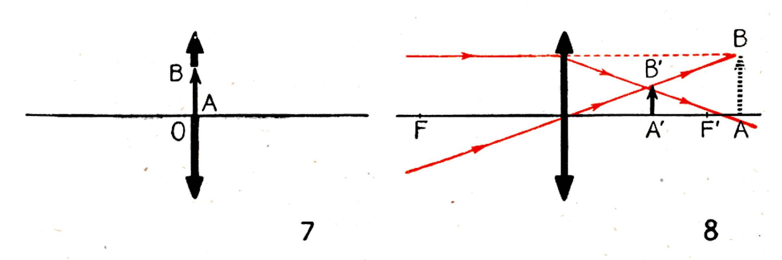


3

4

5

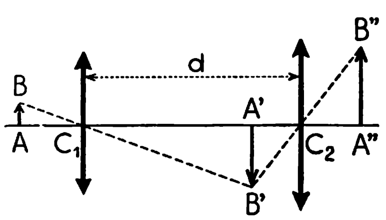
6



274. Constructions des images pour différentes positions de l'objet.

OBJET	IMAGE
1. A l'infini, de diamètre apparent α.	Dans le plan focal image. **Réelle,** renversée. $I = f \times \alpha$.
2. **Réel,** entre l'infini et le double de la distance focale.	**Réelle,** renversée, plus petite que l'objet; située entre le plan focal image et un plan distant de 2 f.
3. **Réel,** à une distance de la lentille égale au double de la distance focale.	**Réelle,** renversée, égale à l'objet; située à une distance égale à 2 f.
4. **Réel,** situé entre 2 f et le plan focal objet.	**Réelle,** renversée, plus grande que l'objet, située entre 2 f et l'infini.
5. Dans le plan focal objet.	Rejetée à l'infini; son diamètre apparent α' est $\alpha' = \frac{O}{f}$.
6. **Réel,** situé entre le foyer objet et le centre optique	**Virtuelle,** droite, plus grande que l'objet, située entre l'infini et le centre optique.
7. **Réel,** sur la lentille.	Coïncide avec l'objet; est égale à l'objet.
8. **Virtuel.**	**Réelle,** droite, plus petite que l'objet, située entre le centre optique et le foyer image.

◇ **276. Cas de deux lentilles successives.** — Il arrive souvent dans les problèmes que l'image A'B' que donne d'un objet AB une première lentille C_1 (*fig. 275*) joue le rôle d'objet par rapport à une lentille C_2 qui en donne une image finale A″B″. La figure montre que :



275. Cas de **deux** lentilles

$$\overline{C_2A'} = \overline{C_2C_1} + \overline{C_1A'}$$
(relation de Chasles)

Si d est la distance des lentilles :

$$d = \overline{C_1C_2}$$
$$p_2 = -d + p'_1$$

ou :

$$\boxed{p_2 = p'_1 - d.}$$

Cette formule est *valable dans tous les cas*, et permet de passer d'une lentille à l'autre en vue de calculer la position de l'image suivante (p'_2) donnée par la seconde lentille, lorsqu'on vient de calculer p'_1, position de l'image donnée par la première.



Photo Schall. (Ateliers S. O. M. Berthiot.)

Polissage des lentilles.

On aperçoit les lentilles collées sur la **balle**, ainsi que le **bassin** excentré.

LECTURE

La fabrication des lentilles.

La plupart des lentilles utilisées dans les instruments d'optique sont des lentilles sphériques. On les obtient mécaniquement par frottement d'une surface métallique sphérique dont le rayon de courbure est celui de la face à réaliser. Si ce rayon est assez grand, on fabrique plusieurs dizaines de lentilles à la fois. Les lentilles en verre moulé sont collées, comme l'indique la figure, dans des alvéoles réparties sur une calotte sphérique de rayon convenable. Cette calotte sphérique est animée d'un mouvement rapide de rotation autour de son axe. Une autre calotte sphérique de même rayon, mais de courbure inverse, vient frotter sur la première; son mouvement est obtenu au moyen d'un excentrique dont on aperçoit le bras de levier. L'usure du verre et son polissage sont obtenus grâce à une bouillie de colcotar ou rouge d'Angleterre (oxyde ferrique). A la fin de l'opération les deux surfaces sphériques, l'une concave appelée le *bassin*, l'autre convexe, la *balle*, s'appliquent exactement l'une sur l'autre. Toutes les lentilles ont alors une face dont le rayon de courbure est celui de la balle. On procède de même pour l'autre face avec des rayons différents ou égaux et on termine par un contrôle optique des surfaces polies.

◀ RÉSUMÉ ▶

Une ***lentille sphérique*** *est constituée par un milieu réfringent limité par deux calottes sphériques ou une calotte sphérique et un plan. On distingue les lentilles à bords minces ou* ***convergentes,*** *les lentilles à bords épais ou* ***divergentes.***

Une lentille convergente mince ne donne d'images nettes que si elle est ***diaphragmée,*** *si l'objet est de petite dimension, perpendiculaire à l'axe et au voisinage de l'axe (approximation de Gauss).*

Le ***centre optique*** *est le point où l'axe traverse la lentille; tout rayon lumineux passant par le centre optique n'est pas dévié.*

Tout rayon incident parallèle à l'axe vient passer par le ***foyer image;*** *tout rayon incident passant par le foyer objet donne un émergent parallèle à l'axe.*

Les distances p et p' de l'objet et de l'image à la lentille sont liées par la relation :

$$\boxed{\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}.}$$

Le grandissement est :

$$\boxed{\gamma=-\frac{p'}{p}.}$$

Une lentille convergente donne toujours une image réelle, sauf dans le cas où l'objet réel se trouve entre le foyer objet et la lentille.

★ EXERCICES ★

219. — A quelle distance d'une lentille convergente de 16 cm de distance focale faut-il placer un objet lumineux pour en obtenir une image réelle 4 fois plus grande? Quelle est la distance de cette image à la lentille? — **Rép.** : *$p = 20$ cm; $p' = 80$ cm.*

220. — Un objet lumineux se trouve à 80 cm d'un écran sur lequel on veut obtenir une image renversée égale à l'objet; où faudra-t-il placer une lentille convergente et quelle sera sa distance focale?

221. — A quelle distance d'une lentille convergente faut-il placer un objet réel pour en obtenir une image virtuelle, 5 fois plus grande, et située à 30 cm de la lentille? Quelle est la distance focale de la lentille? — **Rép.** : *$p = 6$ cm; $f = 7{,}5$ cm.*

222. — On place un objet lumineux de 2 cm à 41 cm d'une lentille convergente de 40 cm de distance focale. Calculer la position, la nature et la grandeur de l'image.

223. — Un appareil photographique donne des images nettes d'objets très éloignés quand l'objectif est à 12 cm de la surface sensible. Comment doit-on modifier cette distance pour prendre le portrait d'une personne à 72 cm de l'objectif?
Rép. : *augmenter de 2,4 cm.*

224. — **Problème de Bessel.** Un objet lumineux est à 1 m d'un écran. Montrer qu'il existe deux positions, que l'on déterminera, d'une lentille de 9 cm de distance focale donnant une image nette sur l'écran. Quel est le grandissement dans chaque cas?

225. — Une lentille convergente a 10 cm de distance focale. A partir de quelle distance les objets peuvent-ils être considérés comme étant à l'infini, leurs images ne pouvant pas être repérées à mieux de 0,5 mm près. — **Rép.** : *20,1 m.*

226. — Un objet lumineux, situé sur l'axe d'une lentille convergente, est à 16 cm de celle-ci; on l'éloigne de 2 cm; son image se déplace de 12 cm. Quelle est la distance focale de la lentille?

Rép. : *12 cm pour image réelle; 28,8 cm pour image virtuelle.*

227. — Un objet de 1 cm de haut se trouve à 15 cm d'une lentille convergente de 20 cm de distance focale. Déterminer la nature, la position et la grandeur de l'image.

228. — Un objet réel de 2 cm de haut se trouve à 25 cm d'une lentille convergente de 15 cm de distance focale; trouver la nature, la position et la grandeur de l'image. On place derrière cette lentille à 10 cm d'elle une autre lentille convergente de 20 cm de distance focale. Déterminer la position et la grandeur de la nouvelle image.

Rép. : *image réelle à 37,5 cm, hauteur 3 cm; image réelle à 11,6 cm, hauteur 1,26 cm.*

229. — De part et d'autre du foyer objet d'une lentille convergente de 20 cm de distance focale et à 1 cm de ce foyer, on place un objet de 1 cm de hauteur. Où se trouvent les images? Calculer leur distance, leur grandeur.

230. — L'axe principal d'une lentille convergente est dirigé vers le centre du soleil; on observe une image de 15 mm de diamètre. Calculer la distance focale de la lentille. — **Rép.** : ***1,66 m.***

231. — Soit une lentille convergente de **10** cm de distance focale. Calculer la distance de l'objet à l'image pour les abscisses suivantes de l'objet : $p = 23$, 22, 21, 19, 18, 17 cm. Tracer la courbe représentant cette distance en fonction de p. Calculer dans chaque cas le grandissement γ et représenter sa variation en fonction de p.

Lorsque l'on mesure la distance focale d'une lentille par la méthode de Silbermann. on cherche à obtenir une image égale à l'objet et on mesure la distance de l'objet à l'image qui est alors $4f$. D'après les deux graphiques précédents, cette méthode vous paraît-elle précise? et pourquoi?

232. — 1° A l'aide d'une lentille convergente L, on forme sur un écran l'image XY d'un objet lumineux AB. Quand l'image XY est égale à l'objet et renversée par rapport à lui, la distance qui sépare l'objet de l'écran est D = 40 centimètres. En déduire la distance focale f de la lentille L et sa position entre l'objet et l'écran.

2° Sans toucher à l'objet et à la lentille, on place entre la lentille et l'écran une lame de verre à faces parallèles (les faces étant perpendiculaires à l axe de la lentille). Son épaisseur est $e = 6$ centimètres et son indice $n = 1,5$. L'image n'est plus nette sur l'écran. Où doit-on placer l'écran pour obtenir une image nette X_1Y_1 de l'objet AB?

3° On dispose maintenant la lame à faces parallèles entre l'objet et la lentille. Où doit-on placer l'écran pour obtenir une image nette X_2Y_2 de l'objet AB?

Rép. : *$f = 10$ cm; au milieu; Il faut reculer l'écran de 2 cm; à 22,5 cm de L.*

233. — Une lentille mince L a une distance focale de 10 cm.

1° Une petite droite lumineuse AB, de hauteur 2 cm, est placée perpendiculairement, en B, à l'axe principal de la lentille à 5 cm de son centre optique C.

Construire l'image de AB donnée par la lentille. Calculer la position et la grandeur de cette image. Tracer la marche d'un faisceau lumineux issu de A (A est situé au-dessus de l'axe principal de la lentille).

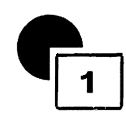
2° On dispose maintenant deux lentilles identiques à L, de façon qu'elles aient même axe principal. La distance de leurs centres optiques C_1, C_2 est 6 cm.

Déterminer les foyers principaux du système formé par les deux lentilles.

CHAPITRE XXVII

LENTILLES DIVERGENTES. CONVERGENCE DES LENTILLES

1. Lentilles sphériques minces divergentes.
2. Théorème des convergences.
3. Calcul de la convergence d'une lentille.



LENTILLES SPHÉRIQUES MINCES DIVERGENTES

■ **277. Centre optique et foyers.** — Nous avons déjà étudié expérimentalement la propriété fondamentale du centre optique d'une lentille quelconque : tout rayon qui passe par ce point traverse la lentille sans être dévié.

Faisons tomber sur une lentille à bord épais un faisceau de lumière cylindrique : il est impossible d'obtenir un point de convergence sur un écran; on y observe une tache lumineuse de plus en plus grande : le faisceau est ***divergent***. Il semble provenir d'un point ***virtuel*** F′, appelé ***foyer image*** (*fig. 276*). La distance de ce foyer au centre optique est la distance focale image f'. Si le faisceau cylindrique n'est plus parallèle à l'axe, le point virtuel de convergence n'est plus F′, mais se trouve dans un plan perpendiculaire à l'axe passant par F′ : c'est le plan ***focal image,*** lui aussi ***virtuel.***

276. Foyers et plans focaux.

Essayons d'obtenir un faisceau sortant parallèle à l'axe; nous serons obligés d'envoyer sur la lentille un faisceau convergent en un point virtuel F, foyer objet virtuel, auquel correspond un plan focal objet virtuel. La distance de ce point F à la lentille est la distance focale objet f.

On constate expérimentalement que la distance focale objet f est égale à la distance focale image. On peut donc énoncer les résultats fondamentaux suivants :

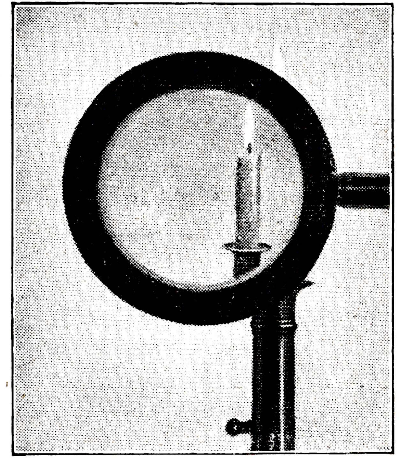
▶ *Tout rayon incident parallèle à l'axe émerge en semblant provenir du foyer virtuel image.*

▶ *Tout rayon se dirigeant sur le foyer virtuel objet émerge parallèlement à l'axe.*

▶ *Quelle que soit la forme de la lentille, les foyers virtuels objet et image sont symétriques par rapport au centre optique.*

En résumé, tout ce que nous avons appris au sujet des lentilles convergentes, où foyers objet et image étaient réels, s'applique ici avec des foyers virtuels.

■ **278. Images données par une lentille divergente.** — Plaçons une bougie devant une lentille divergente et cherchons son image sur un écran : on n'en trouve pas, et on constate que le faisceau lumineux est divergent dès sa sortie de la lentille. Mais si on place l'œil derrière la lentille, on observe une image droite de la bougie, plus petite que l'objet (*fig. 277*). Pour pouvoir recueillir une image réelle sur un écran, il faudrait utiliser un objet virtuel situé entre le foyer objet (virtuel) et la lentille.

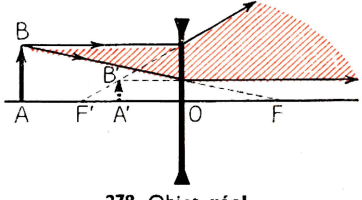


277. Image **virtuelle** d'un objet **réel.**

▶ *Une lentille divergente ne donne jamais d'image réelle, sauf quand l'objet, virtuel, est situé entre la lentille et son foyer objet.*

Comme dans le cas des lentilles convergentes, on constate facilement que l'objet et l'image se déplacent dans le même sens, et que les images reçues sur un écran sont d'autant meilleures que la lentille est plus diaphragmée (approximation de Gauss).

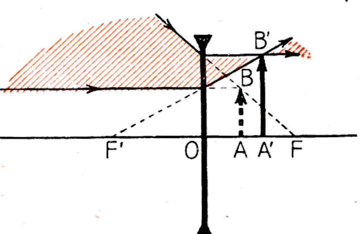
■ **279. Construction des images.** — Nous utiliserons les mêmes règles que pour les lentilles convergentes ou les miroirs. Prenons le cas d'un objet *réel* (*fig. 278*). Nous construisons l'image du point B en menant par B un rayon parallèle à l'axe. Il émerge de la lentille en venant du foyer image F′; le rayon BF, passant par le foyer objet F est arrêté par la lentille et l'émergent correspondant est parallèle à l'axe. Les deux émergents se coupent en B′. Remarquons que B et B′ sont alignés avec le centre



278. Objet **réel.**

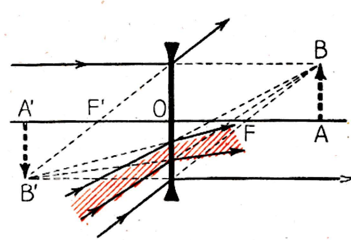
optique O. En abaissant la perpendiculaire à l'axe B'A', on obtient l'image de l'objet BA. Cette image est ***virtuelle.***

La *figure 279* répète les mêmes constructions dans le cas d'un objet ***virtuel*** situé entre le centre optique et le foyer objet : l'image est alors ***réelle.***



279. Objet **virtuel** entre le centre optique et le foyer.

La *figure 280* donne la construction de l'image dans le cas d'un objet situé au-delà du foyer objet; l'image est ***virtuelle*** et ***renversée.***



280. Objet **virtuel** au-delà du foyer.

■ 280. Formules des lentilles divergentes. — Reprenez la construction de l'image d'un objet en utilisant les rayons parallèles à l'axe et passant par les foyers. Vous retrouverez les mêmes triangles rectangles semblables que dans le cas d'une lentille convergente, mais diversement placés. Vous écrirez les mêmes relations et serez conduits aux formules :

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$$

$$\gamma=-\frac{p'}{p}.$$

Si l'on prend les conventions de signes habituelles, ces formules s'appliquent dans tous les cas, ***à condition d'y faire entrer f avec son signe***

▶ *Les formules des lentilles minces, convergentes ou divergentes, forment un groupe unique, où f est compté positivement pour les lentilles convergentes, négativement pour les lentilles divergentes.*

¶ **Remarques :** 1. Les formules de Newton sont encore valables.
2. Les formules du *paragraphe 271* sont encore valables.
3. On peut toujours appliquer la formule : $p_2 = p'_1 - d$.

EXEMPLE. — *Devant une lentille divergente de 12 cm de distance focale, on place un objet lumineux de 4 cm de haut et à 4 cm de la lentille. Déterminer son image.*

Cherchons d'abord la position de l'image : $p = +4 \quad f = -12$

$$\frac{1}{4}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{-12} \qquad \text{d'où l'on tire :} \qquad p' = -3 \text{ cm}.$$

L'image est donc virtuelle, et à **3 cm** de la lentille.

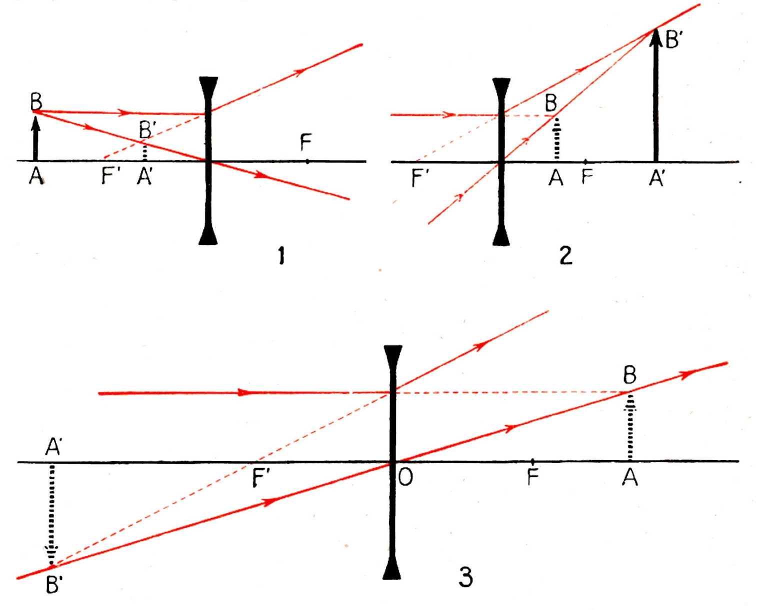
Le grandissement est donné par : $\gamma = -\frac{p'}{p} = -\frac{-3}{+4} = \frac{3}{4}$.

L'image est donc droite, et mesure $\frac{3}{4} \times 4 = 3$ cm.

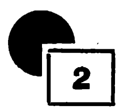
■ **281. Positions relatives de l'image et de l'objet.** — Elles sont résumées dans le tableau suivant. La *figure 281* rappelle les constructions de l'image dans trois cas principaux.

OBJET	IMAGE
1. **Réel,** entre l'infini et la lentille.	**Virtuelle,** droite, plus petite que l'objet; située entre le foyer image et le centre optique.
2. **Virtuel,** entre la lentille et le foyer objet.	**Réelle,** droite, plus grande que l'objet; située entre la lentille et l'infini.
3. **Virtuel,** entre le foyer objet et l'infini.	**Virtuelle,** renversée, située entre l'infini et le foyer image.

Remarquez que l'image donnée par une lentille divergente est toujours virtuelle sauf dans le cas où l'objet virtuel est situé entre le centre optique et le foyer objet.



281. Constructions des images dans les trois cas principaux.



THÉORÈME DES CONVERGENCES

■ **282. Convergence d'une lentille.** — Revoyez les figures donnant différentes marches de rayons ou de faisceaux à travers une lentille à bord mince, ou convergente. Vous remarquerez que la lumière est toujours rabattue vers l'axe par rapport à sa direction primitive.

Une lentille à bord mince a tendance à faire converger la lumière qu'elle reçoit, et par conséquent à donner une image réelle; mais si le faisceau incident est trop divergent, la lentille ne peut que diminuer cette divergence sans rendre pour cela le faisceau convergent : on obtient une image virtuelle dans le cas d'un objet réel situé entre le foyer objet et la lentille.

Dans le cas d'une lentille à bord épais, ou divergente, vous verrez qu'au contraire la lumière est toujours écartée de l'axe par rapport à sa direction d'entrée. *Une lentille à bord épais a tendance à faire diverger la lumière qu'elle reçoit.* Elle ne pourra donc jamais donner d'un objet réel une image réelle, puisque le faisceau incident est déjà divergent et que par conséquent le faisceau réfracté le sera encore plus. Pour obtenir une image réelle, il faut que la lumière incidente soit tellement convergente (objet virtuel entre la lentille et le foyer objet) que malgré la diminution de sa convergence à la traversée de la lentille, il reste toujours convergent après réfraction.

■ **283. Unité de convergence.** — Un faisceau parallèle à l'axe tombant sur une lentille convergente se réfracte en passant par le foyer image F′. La lentille le fera d'autant plus converger que ce foyer sera plus près d'elle, donc que sa distance focale sera plus petite. La convergence de la lentille est donc en raison inverse de sa distance focale, et on pose par définition :

$$C_{\text{dioptrie}} = \frac{1}{f_{\text{mètre}}}.$$

La dioptrie mesure donc la convergence d'une lentille convergente de 1 mètre de distance focale. Une lentille de 25 cm de distance focale aura une convergence de 4 dioptries; à une distance focale de 2 mètres correspondra une convergence de 0,5 dioptrie, etc.

Cette formule s'applique aussi aux lentilles divergentes, en convenant de compter une divergence comme une convergence négative; il suffira donc d'employer la formule en y comptant f négativement, selon la convention déjà admise.

● EXEMPLE. — *Une lentille divergente a 12,5 cm de distance focale. Calculer sa convergence.*

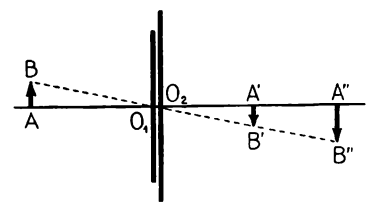
$$f = -12{,}5 \text{ cm} = -0{,}125 \text{ mètre.}$$

$$C = \frac{1}{f} = -\frac{1}{0{,}125} \qquad \text{ou} \qquad C = -8 \text{ dioptries.}$$

284. Théorème des convergences pour des lentilles minces accolées. — Plaçons les unes contre les autres plusieurs lentilles minces convergentes ou divergentes de façon que leurs axes coïncident : on dit qu'elles sont *accolées*. Leurs centres optiques, puisqu'elles sont minces, peuvent être considérés comme confondus.

Considérons d'abord le cas de deux lentilles quelconques O_1, O_2 (*fig.* 282). La première lentille O_1 donne d'un objet AB une image A′B′, et l'on a :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f_1}.$$



282. Théorème des convergences.

Mais A′B′ joue le rôle d'objet pour la lentille O_2. La figure fait comprendre que si A′B′ est image réelle, elle joue le rôle d'objet virtuel pour la seconde lentille, et inversement. La quantité p', abscisse de l'objet pour la seconde lentille, doit donc être changée de signe, et finalement la position de l'image finale A″B″ est donnée par :

$$\frac{1}{-p'} + \frac{1}{p''} = \frac{1}{f_2}.$$

Les deux relations précédentes ajoutées membre à membre donnent :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p''} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}.$$

On voit que la formule globale de conjugaison est identique à celle d'une seule lentille dont la distance focale F serait telle que :

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

soit : $C = c_1 + c_2.$

Mais on peut ajouter une troisième lentille : les deux premières jouant le rôle d'une seule, on peut appliquer le théorème pour deux lentilles :

$$C' = C + c_3 = c_1 + c_2 + c_3.$$

▶ ***Théorème** : Plusieurs lentilles minces accolées équivalent à une lentille unique dont la convergence est égale à la somme algébrique des convergences de chaque lentille.*

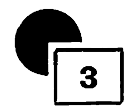
$$\boxed{C = c_1 + c_2 + c_3 + \text{etc.}}$$

● EXEMPLE. — *On accole une lentille convergente de 2 dioptries avec une lentille divergente de 25 cm de distance focale. Quelle est la convergence du système ?*

La convergence de la deuxième lentille est : $C_2 = \frac{1}{-0{,}25\text{ m}} = -4$ **dioptries.**

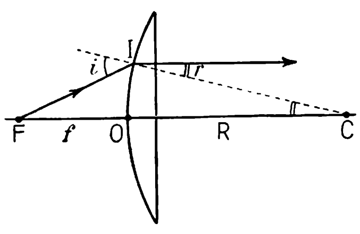
La convergence de l'ensemble vaut : $C = c_1 + c_2 = 2 - 4 = -2$ **dioptries.**

Les deux lentilles accolées équivalent à une seule lentille divergente de **50 cm** de distance focale.



CALCUL DE LA CONVERGENCE

◇ **285. Cas d'une lentille plan convexe.** — Considérons le foyer objet F situé du côté de la face convexe, et C le centre de la sphère de rayon R qui constitue cette face (*fig. 283*). Un rayon incident passant par F fait en I un angle d'incidence i avec la normale CI (qui est le rayon) et se réfracte parallèlement à l'axe : en effet, pour sortir par la face plane normalement à cette face, il faut qu'il tombe normalement sur cette face. L'angle de réfraction est r, qui se retrouve en C (alternes-internes). Et l'on a, dans le triangle FIC :



283. Calcul de la convergence.

$$i = \hat{F} + r.$$

N'oublions pas que dans l'approximation de Gauss les angles i et r sont petits, ainsi que l'arc OI assimilable à un petit segment. On peut donc écrire :

$$i = nr \qquad \hat{F} = \frac{OI}{f} \qquad r = \frac{OI}{R}.$$

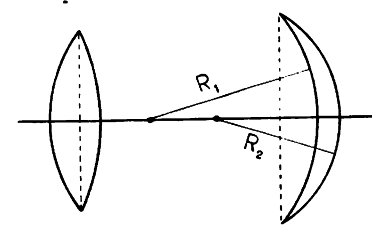
En remplaçant :

$$n\frac{OI}{R} = \frac{OI}{f} + \frac{OI}{R}$$

ou encore :

$$\frac{1}{f} = (n-1)\frac{1}{R}.$$

◇ **286. Cas d'une lentille quelconque.** — On remarquera qu'une lentille biconvexe peut être considérée comme deux lentilles plan convexes, de rayons R_1 et R_2, accolées par leurs faces planes. Appliquons le théorème des convergences :



284. Calcul de la convergence.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

$$\frac{1}{f} = (n-1)\frac{1}{R_1} + (n-1)\frac{1}{R_2}$$

$$\boxed{\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right).}$$

Un ménisque convergent peut être obtenu en enlevant d'une lentille plan convexe une autre lentille plan convexe (*fig. 284*); on aura :

$$\frac{1}{f} = -\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = (n-1)\left(-\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right).$$

On voit que la formule se généralise, à condition de compter négativement les rayons des faces creuses.

▶ *La formule* $\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$ *est générale, à condition de compter positivement les rayons R pour les faces convexes, négativement pour les faces concaves,* $\frac{1}{R}$ *étant nul pour une face plane.*

● EXEMPLE. — *Calculer la distance focale d'un ménisque convergent, d'indice n = 1,5, le rayon de courbure de la face concave étant de 20 cm, celui de la face convexe étant de 10 cm.*

La formule générale donne :

$$\frac{1}{f} = (1,5 - 1)\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{20}\right)$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{20} \qquad \text{d'où} \qquad f = 40 \text{ cm.}$$

◀ *RÉSUMÉ* ▶

Les foyers objet et image d'une lentille ***divergente*** *sont virtuels. Une telle lentille ne donne jamais d'image réelle, sauf quand l'objet est virtuel et situé entre le foyer objet (virtuel) et la lentille.*

Les formules de conjugaison et de grandissement des lentilles convergentes s'appliquent aux lentilles divergentes à condition d'y compter négativement la distance focale.

La ***convergence*** *d'une lentille en dioptrie est par définition :*

$$\boxed{C_{\text{dioptrie}} = \frac{1}{f_{\text{mètre}}}.}$$

La convergence d'une lentille divergente doit être considérée comme négative.

Un système de lentilles minces accolées est équivalent à une lentille unique, dont la convergence est donnée par le ***théorème des convergences :***

$$\boxed{C = c_1 + c_2 + c_3 + \text{etc.}}$$

où c_1, c_2, c_3, *etc. figurent avec leurs valeurs algébriques.*

La convergence d'une lentille peut être calculée en fonction de son indice et des rayons de courbure de ses faces par la formule :

$$\boxed{\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}$$

dans laquelle les rayons sont comptés ***positivement pour les faces convexes et négativement pour les faces concaves.***

★ EXERCICES ★

234. — Déterminer la nature et la position d'un objet dont une lentille divergente de 12 cm de distance focale doit donner une image réelle 3 fois plus grande. Où se trouve alors l'image? — **Rép.** : $p = -8$ *cm*; $p' = 24$ *cm*.

235. — Une lentille divergente reçoit parallèlement à son axe un faisceau cylindrique de 4 cm de diamètre. Sur un écran placé à un mètre derrière la lentille, on observe une tache circulaire de 20 cm de diamètre. Calculer la distance focale de la lentille en cm, et sa convergence en dioptries.

236. — On regarde à travers une lentille divergente de — 5 dioptries un objet situé à 1 m derrière cette lentille. A quelle distance de la lentille voit-on son image, et quel est le grandissement? — **Rép.** : $p' = -16{,}7$ *cm*; $\gamma = 0{,}167$.

237. — On accole à une lentille convergente de distance focale 16 cm, une seconde de distance focale 50 cm, et une troisième de distance focale 34 cm. Calculer la convergence de l'ensemble.

238. — A une lentille convergente de 20 cm de distance focale on accole une seconde lentille pour que la convergence de l'ensemble soit de 4 dioptries. Déterminer la nature de cette deuxième lentille et calculer sa distance focale.
Rép. : $f = -100$ *cm*.

239. — On accole par leurs faces planes une lentille plan convexe, de rayon de courbure 30 cm, d'indice 1,50, et une autre lentille de même forme mais d'indice 1,52. Calculer la convergence et la distance focale de l'ensemble.

240. — On emboîte les faces courbes de même rayon R d'une lentille plan concave d'indice 1,50 et d'une lentille plan convexe d'indice 1,54. Calculer en fonction de R la distance focale de l'ensemble. Cas particulier : R = 20 cm.
Rép. : $f = 25\,R = 5$ *m*.

241. — Une lentille plan concave, d'indice 1,5, a une convergence de — 4 dioptries. Calculer le rayon de courbure de la face concave. On dispose la face plane sur une table et on remplit d'eau la face creuse; l'indice de l'eau étant 4/3, calculer la convergence de l'ensemble.

242. — Calculer la convergence d'un ménisque divergent, d'indice 1,5, et dont les rayons de courbure des faces sont égaux à 20 cm et 30 cm. — **Rép.** : — *0,83 dioptrie*.

243. — En accolant une lentille biconcave à une lentille convergente de 9 dioptries, on obtient un système convergent qui donne d'un objet lumineux placé à 75 cm du système une image réelle à 37,5 cm. Les rayons de courbure des sphères formant la lentille divergente sont égaux à 16 cm pour une face et 34 cm pour l'autre face. Calculer l'indice du verre de la lentille divergente. — **Rép.** : *1,544*.

244. — **Appareil photographique.** L'objectif d'un appareil photographique est formé d'une lentille équiconvexe d'indice 1,52 situé à une distance fixe de 12,5 cm de la plaque sensible.

1° L'appareil est ainsi réglé pour la photographie d'objets très éloignés. Calculer la convergence de l'objectif.

2° Calculer le rayon de courbure des faces de la lentille.

3° On veut faire le portrait d'une personne située à 112,5 cm; calculer la distance focale de la lentille qu'il faut accoler à l'objectif.

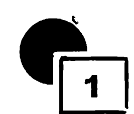
4° Cette lentille a pour indice 1,5 et sa face bombée a pour rayon de courbure 37,5 cm. Quelle est sa forme; que vaut le rayon de courbure de l'autre face?

Rép. : *8 dioptries; 13 cm; 112,5 cm; ménisque convergent; 112,5 cm.*

CHAPITRE XXVIII

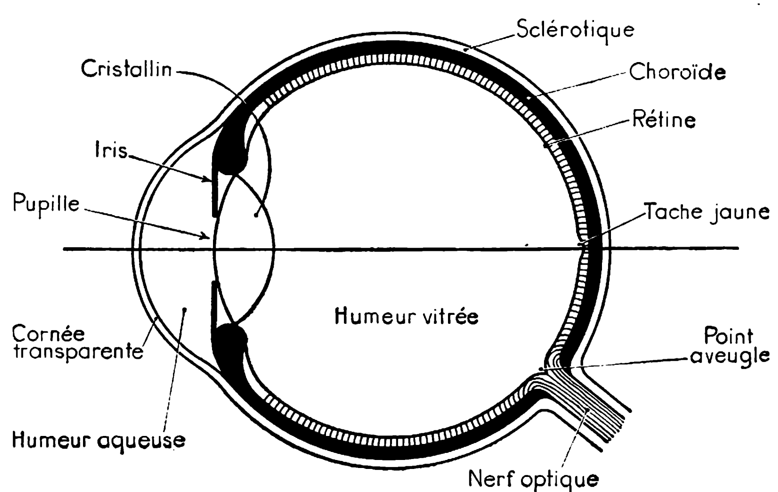
L'ŒIL

1. Accommodation.
2. Défauts de l'œil.
3. Qualités de l'image rétinienne.



ACCOMMODATION

■ **287. Œil réduit.** — Le globe oculaire, à peu près sphérique et de 2 cm de diamètre, est limité par la *sclérotique* (blanc de l'œil), qui devient la *cornée* transparente en avant de l'œil (*fig. 285*); puis, on rencontre la *choroïde,* membrane noire qui ne laisse passer aucune lumière

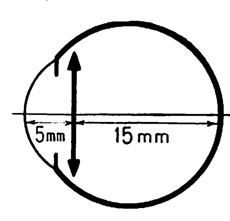


285. Schéma de l'œil.

parasite pouvant venir de l'extérieur; enfin la *rétine,* dont les cellules sont impressionnables par les diverses radiations lumineuses, et qui est l'épanouissement du *nerf optique;* la rétine est insensible au point

d'arrivée du nerf optique (*point aveugle* ou *punctum cœcum*) et possède une sensibilité maximum à la *tache jaune* (*fovea centralis*) d'environ 2 mm de diamètre, se trouvant à peu près sur l'axe optique de l'œil.

Vers l'avant de l'œil, soutenue par des muscles, se trouve une lentille biconvexe, élastique : le *cristallin;* devant cette lentille est un diaphragme, l'*iris*, dont l'ouverture, appelée *pupille*, est variable, et commandée par des mouvements réflexes : lorsqu'on regarde des objets sombres la pupille se dilate; elle se contracte si on reçoit une lumière vive. Devant le cristallin est un liquide transparent, l'*humeur aqueuse;* derrière le cristallin est une sorte de gelée transparente, l'*humeur vitrée*.



286. Œil réduit.

Tous ces milieux transparents forment une succession de dioptres, donnant sur la rétine une image réelle et renversée des objets. On peut simplifier ce système optique compliqué en le remplaçant par une seule lentille mince (œil réduit), située à 15 mm de la rétine et à 5 mm de la cornée transparente (*fig. 286*).

■ **288. Accommodation.** — L'image d'un objet situé à une distance p de l'œil se forme sur la rétine dont la distance à la lentille de l'œil réduit est constante : $p' = 15$ mm. La relation de conjugaison étant : $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$, comment les images pourront-elles être nettes avec dfférentes valeurs de p puisque p' est constant ? Il faut que f varie : c'est l'accommodation. Sous l'action de muscles agissant par un acte réflexe, la face antérieure du cristallin se bombe plus ou moins; il en résulte une variation de la convergente $\frac{1}{f}$.

Lorsque les muscles sont relâchés, l'œil voit à une distance maximum Δ; si les muscles sont contractés au maximum, l'œil voit à une distance minimum δ.

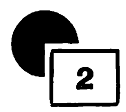
▶ **Définition.** *L'accommodation permet à l'œil, par modification de la convergence du cristallin, de voir nettement les objets entre le « punctum remotum » situé à une distance Δ, distance maximum de vision distincte, et le « punctum proximum » situé à une distance δ, distance minimum de vision distincte.*

La différence $\Delta - \delta$ est le *parcours de vision nette*.

La différence $\frac{1}{\delta} - \frac{1}{\Delta}$ s'appelle *l'amplitude dioptrique d'accommodation;* elle s'exprime en dioptries les longueurs étant exprimées en mètres.

L'œil normal est celui qui voit nettement à l'infini sans accommoder : $\Delta = \infty$. Pour cet œil, on convient généralement que δ, variable avec les individus, est de l'ordre de 25 cm. L'amplitude dioptrique de l'œil normal est ainsi :

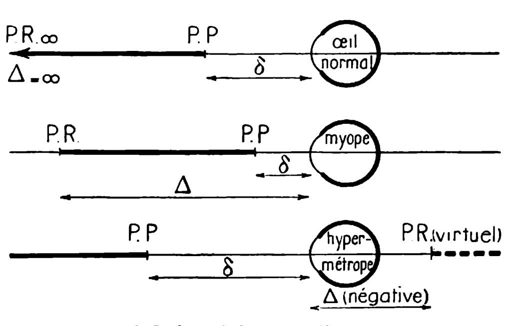
$$\frac{1}{0,25} - \frac{1}{\infty} = 4 \text{ dioptries.}$$



DÉFAUTS DE L'ŒIL

■ **289. Œil myope.** — L'œil *myope* est *trop convergent;* au repos, il ne voit pas les objets situés à l'infini, car sa distance focale étant trop courte, le foyer est en avant de la rétine. Cet œil ne verra donc sans accommoder que des objets déjà rapprochés à une distance Δ.

On constate en même temps que sa distance minimum de vision distincte δ est faible (*fig. 287*). Pour corriger le défaut et transformer l'œil myope en œil normal, il faudra diminuer sa convergence par *adjonction d'un verre divergent* (théorème des convergences). L'œil voyant sans accommoder à la distance Δ, la lentille devra donner du point à l'infini une image située à Δ; donc la lentille divergente aura pour distance focale la distance maximum de vision distincte du myope.



287. Les défauts de l'œil.

● EXEMPLE. — *Un myope a sa vue corrigée par un verre divergent de — 2,5 dioptries. Calculer sa distance maximum de vision distincte.*

La distance focale de la lentille correctrice est :

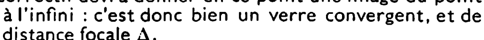
$$f = \frac{1}{-2,5} = -0,4 \text{ mètre.}$$

Donc : Δ = **40 cm.** Le myope ne peut voir nettement, sans lunettes, au-delà de cette distance.

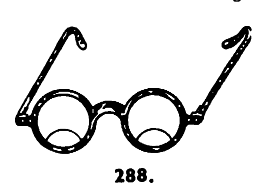
■ **290. Œil hypermétrope.** — C'est le défaut contraire : l'œil *hypermétrope n'est pas assez convergent*; le foyer est en arrière de la rétine quand l'œil n'accommode pas. Pour voir un objet à l'infini, l'œil hypermétrope doit déjà accommoder (*fig. 287*). On constate que son « punctum proximum » est en général éloigné. Pour corriger le défaut et transformer l'œil hypermétrope en œil normal, on doit augmenter sa convergence, c'est-à-dire lui *adjoindre une lentille convergente* (théorème des convergences), pour que, sans accommodation, l'image d'un point à l'infini se forme sur la rétine.

¶ **Remarque :** On peut dire que, sans accommoder, l'œil hypermétrope serait capable de voir un objet virtuel : son « punctum remotum » est en arrière de l'œil. En effet, un faisceau incident parallèle converge en arrière de la rétine; pour que la

convergence se fasse sur la rétine, il faudrait que le faisceau incident soit déjà convergent, ce qui correspond bien à un objet virtuel. Pour que cet œil voie sans accommoder à l'infini, le verre convergent correctif devra donner en ce point une image du point



à l'infini : c'est donc bien un verre convergent, et de distance focale Δ.



288.

■ 291. Œil presbyte. — La presbytie consiste en une diminution de la faculté d'accommodation : le parcours de vision nette est considérablement réduit. La presbytie apparaît avec l'âge. Un presbyte devra utiliser une *série de verres de convergences différentes* pour réaliser une accommodation artificielle (*fig. 288*).

● **EXEMPLE.** — *Le punctum proximum d'un presbyte est rejeté à 50 cm; quelle lentille faut-il placer devant cet œil pour que le presbyte puisse lire un journal à 25 cm?*

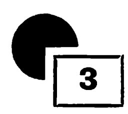
La lentille doit donner de l'objet réel placé à **25 cm** une image virtuelle située à **50 cm** de l'œil. Ce ne peut être qu'une lentille convergente et l'objet réel se trouvera entre le plan focal objet et la lentille. Calculons sa distance focale : $p = 25$ cm, $p' = -50$ cm.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{25} - \frac{1}{50} = \frac{1}{50}$$

d'où $f = 50$ cm.

Le presbyte utilisera pour la lecture une lentille convergente de **50 cm** de distance focale, donc de convergence **2 dioptries**.

Remarquons que l'image virtuelle est deux fois plus grande que l'objet.



QUALITÉS DE L'IMAGE RÉTINIENNE

◇ 292. Grandeur des images. — Le grandissement est donné par la formule $\gamma = -\frac{p'}{p}$. Or, dans l'œil, p' est constant et positif; p est variable et positif. L'image rétinienne, renversée, est donc d'autant plus grande, et ceci proportionnellement, que l'objet est plus rapproché : un myope pourra voir des détails qu'un œil normal ne verrait pas, à condition d'observer l'objet le plus près possible.

● **EXEMPLE.** — *Un hypermétrope ne peut voir plus près que 60 cm; un myope peut voir jusqu'à 10 cm; ils regardent tous les deux un même objet à la plus petite distance. Comparer les longueurs des images rétiniennes.*

Pour l'hypermétrope, le grandissement est :

$$\gamma = -\frac{p'}{p} = -\frac{p'}{60}.$$

Pour le myope, il vaut :

$$\gamma' = -\frac{p'}{p} = -\frac{p'}{10}.$$

$\frac{\gamma'}{\gamma} = 6$. Le myope peut donc voir des détails 6 fois plus petits que ceux vus par l'hypermétrope.

◇ **293. Finesse des images : acuité visuelle.** — La rétine est formée de cellules juxtaposées. Si l'œil observe deux points lumineux A et B, et que leurs images se forment sur la même cellule, celle-ci ne pouvant transmettre qu'une seule sensation au cerveau, l'œil ne verra qu'un seul point. Pour que l'œil distingue les deux points, il faut que leurs images se forment sur deux cellules distinctes, donc que les points A et B ne soient pas trop rapprochés.

▶ ***Définition.*** *On appelle pouvoir séparateur de l'œil le plus petit diamètre apparent de deux points que l'on voit distinctement.*

Cet angle vaut environ 1′ ou $\frac{3}{10\,000}$ radian. Cette valeur n'est que moyenne car elle dépend des conditions d'éclairage, de la fatigue, de l'individu, etc.

On peut mesurer le pouvoir séparateur ou acuité visuelle en observant une mire formée de traits parallèles dont l'épaisseur est égale à l'équidistance e des bords (*fig. 289*). A partir d'une certaine distance D, on ne voit plus qu'une teinte uniformément grise. Le pouvoir séparateur est alors :

$$\varepsilon = \frac{e}{D} \text{ radian.}$$



289. Mire.

¶ **Remarque** : Observez une image de journal ou de revue; vous y voyez des gris plus ou moins clairs. Regardez de très près, au besoin avec une loupe, si vous n'êtes pas assez myope. Tout le dessin est fait de petits points noirs et blancs. Mais à une certaine distance, l'œil ne les sépare plus, et voit une teinte fondue.

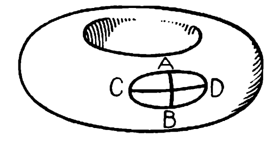
● EXEMPLE. — *Deux bougies sont distantes de 6 cm. A partir de quelle distance ne pourra-t-on plus distinguer les deux flammes?*

Les deux flammes, à la distance x cm, seront vues par l'œil juste sous un angle de $\frac{3}{10\,000}$ radian.

$$\frac{6}{x} \cdot \frac{3}{10\,000}$$

d'où : $x = \frac{3}{60\,000}$ cm ou : **200 mètres.**

◇ **294. Astigmatisme.** — Les images rétiniennes peuvent être mauvaises par suite de l'*astigmatisme* de l'œil; la convergence de l'œil n'est pas la même dans le plan vertical et le plan horizontal par exemple, ou dans deux autres plans. On corrigera ce défaut en plaçant devant l'œil une lentille torique, c'est-à-dire découpée dans un tore (figure géométrique dont une chambre à air gonflée donne une idée). On voit (*fig. 290*) que la lentille est plus bombée selon la ligne AB que selon la ligne CD. On pourra ainsi, en orientant convenablement le verre de lunette (qui ne devra pas tourner dans sa monture) redonner à l'œil une convergence constante dans toutes les directions.



290. Verres toriques.

◀ RÉSUMÉ ▶

L'œil peut être assimilé à une lentille convergente située à distance fixe de la rétine, écran sur lequel se forment les images réelles et renversées des objets que l'on regarde.

*Par l'****accommodation****, la convergence du cristallin augmente et la rétine reçoit les images nettes d'objets de plus en plus rapprochés.*

*Sans accommoder, l'****œil normal*** *voit nettement à l'infini; l'****œil myope*** *à une distance appelée maximum de vision distincte; l'****œil hypermétrope*** *doit déjà accommoder pour voir à l'infini.*

La myopie est corrigée par un verre divergent, l'hypermétropie par un verre convergent.

Lorsque l'œil accommode au maximum, il voit les objets situés au minimum de vision distincte.

La presbytie se corrige par l'emploi de plusieurs verres différents.

Le ***pouvoir séparateur*** *de l'œil est d'environ 1′, soit* $\frac{3}{10\,000}$ *radian.*

★ EXERCICES ★

245. — La lentille d'un œil réduit étant à 15 mm de la rétine, entre quelles limites varie sa distance focale pour un œil qui peut voir entre 20 cm et 2 mètres?
Rép. : *de 13,95 mm à 14,88 mm.*

246. — Un œil myope voit sans accommoder les objets situés à 1 mètre. La rétine étant à 15 mm de la lentille de cet œil réduit, quelle est la distance du foyer image de cette lentille à la rétine? Faudrait-il modifier beaucoup la forme de l'œil pour le transformer en œil normal?

247. — Un myope ne voit que les objets compris entre 12 cm et 80 cm. Il achète des verres divergents de 1,25 dioptries. Entre quelles limites verra-t-il, muni de ses lunettes? — **Rép.** : *de l'∞ à 14,1 cm.*

248. — A quelle distance ne peut-on plus distinguer les deux phares d'une automobile (en direction de l'observateur) séparés l'un de l'autre par 80 cm?

249. — Supposant que la lentille mince d'un œil réduit, à 15 mm de la rétine soit une lentille équiconvexe d'indice 1,5, calculer le rayon de courbure des deux faces. L'œil correspondant est normal et peut voir en accommodant jusqu'à 25 cm. Quel est alors le rayon de courbure d'une des faces, l'autre ne s'étant pas modifié?
Rép. : *15 mm; 13,4 mm.*

250. — Un œil normal regarde la lune, dont le diamètre apparent est de 30′. Quel est le diamètre de l'image rétinienne, la rétine étant à 15 mm du centre optique de l'œil?

251. — Un œil complètement presbyte ne peut voir nettement les objets qu'à 4 mètres. Quelle est la distance focale et la convergence en dioptries du verre qu'il faut utiliser pour que cet œil voie à 25 cm. — **Rép.** : *f = 26,7 cm; 3,75 dioptries.*

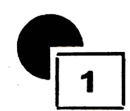
252. — Un œil peut voir entre 20 cm et 4 m. Calculer en dioptries la valeur de son amplitude dioptrique.

253. — La distance minimum de vision distincte d'un œil est de 10 cm; quelle est la distance de son « punctum remotum », l'amplitude dioptrique étant de 8,4 dioptries.
Rép. : *62,5 cm.*

CHAPITRE XXIX

LA LOUPE

1. Principe; mise au point.
2. Puissance.
3. Grossissement.

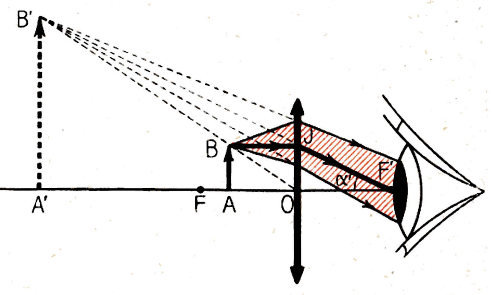


PRINCIPE; MISE AU POINT

■ **295. Principe de la loupe.** — A l'œil nu, on ne peut percevoir que des détails dont le diamètre apparent est supérieur au pouvoir séparateur de l'œil, soit 1′ ou $\frac{3}{10\,000}$ radian. Si l'œil observe à une distance de 15 cm, le plus petit détail perceptible aura comme grandeur : $\frac{15 \times 3}{10\,000} = 0{,}0045$ cm soit $\frac{4}{100}$ à $\frac{5}{100}$ mm. Tout instrument d'optique d'observation a comme principal but d'améliorer cette perception des détails; pour cela il substitue à l'objet une *image virtuelle de diamètre apparent plus grand.* On dit qu'il « grossit ».

Ces instruments d'optique se divisent en deux catégories : ceux qui sont destinés à l'observation des objets petits et rapprochés, tels la *loupe* et le *microscope;* ceux qui sont utilisés dans l'observation d'objets éloignés; ce sont les *lunettes.*

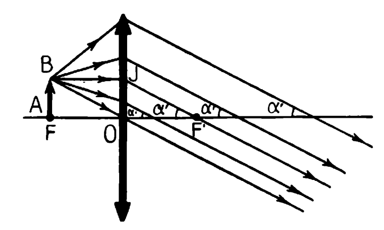
La ***loupe*** est le plus simple des instruments d'optique : elle est constituée par une lentille convergente de petite distance focale. Pour obtenir une image *virtuelle,* il faut placer l'objet entre le plan focal objet et la loupe (*fig. 291*). La construction de l'image est indiquée sur cette figure.



291. Principe de la loupe.

Supposons l'œil placé au foyer image F'; le rayon parallèle à l'axe issu de B, émerge en passant par F'. L'angle α' que cet émergent fait avec l'axe n'est autre que le diamètre apparent de l'image A'B'. Si on déplace l'objet AB entre F et O, cet angle ne change pas.

▶ *Si l'œil est au foyer image de la loupe, l'image d'un objet donné est toujours vue sous le même diamètre apparent.*



292. Objet dans le plan focal objet de la loupe.

Supposons qu'un œil normal utilise une loupe en regardant l'image A'B' à l'infini; l'objet AB est dans le plan focal objet (*fig. 292*) et tous les rayons qu'il émet sortiront parallèles entre eux dans la direction BO (le rayon passant par le centre optique n'étant pas dévié). Il en résulte que l'œil, placé n'importe où, verra toujours l'image sous un même diamètre apparent α'.

▶ *Si l'image est rejetée à l'infini, son diamètre apparent est indépendant de la position de l'œil de l'observateur.*

■ **296. Latitude de mise au point.** — Pour que l'œil voie nettement l'image A'B' il faut que celle-ci soit à une distance de l'œil comprise entre Δ et δ.

▶ ***Définition.*** *La latitude de mise au point est la distance des deux positions extrêmes entre lesquelles on peut déplacer l'objet pour que l'image puisse toujours être observée par l'œil.*

Cette latitude de mise au point n'est jamais très grande : elle est de l'ordre de quelques millimètres.

● **EXEMPLE.** — *Un observateur pour lequel $\Delta = 2$ mètres, $\delta = 20$ cm, observe un objet à l'aide d'une loupe de 2 cm de distance focale. Calculer la latitude de mise au point.*

Dans la vision au « punctum remotum », l'œil étant placé au foyer de la loupe, on aura :

$$p_1' = -(200 - 2) = -198 \text{ cm.}$$

La position de l'objet sera donnée par :

$$\frac{1}{p_1} - \frac{1}{198} = \frac{1}{2} \quad \text{d'où} \quad p_1 = 1{,}98 \text{ cm.}$$

Pour la vision au « punctum proximum », on aura de même :

$$p_2' = -(20 - 2) = -18 \text{ cm.}$$

$$\frac{1}{p_2} - \frac{1}{18} = \frac{1}{2} \quad \text{d'où} \quad p_2 = 1{,}80 \text{ cm.}$$

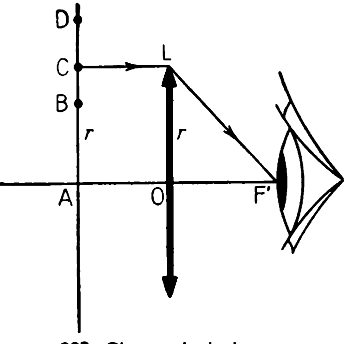
La latitude de mise au point cherchée vaut :

$$p_1 - p_2 = 1{,}98 - 1{,}80 \quad 0{,}18 \text{ cm.}$$

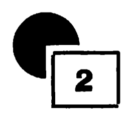
◇ **297. Champ de la loupe.** — Plaçons l'œil au foyer image F', et cherchons quelle étendue d'objet il peut voir à travers la loupe.

▶ ***Définition.*** *On dit qu'un point objet est dans le champ de la loupe si son image peut être vue par l'œil.*

On peut mesurer ce champ par le rayon du cercle du plan objet contenant tous les points vus par l'œil. Or le dernier rayon entrant dans l'œil est celui qui touche le bord de la loupe en L (*fig. 293*). Le réfracté passant par F' où se trouve l'œil, provient d'un incident parallèle à l'axe qui correspond au point C du plan objet. AC est le rayon du champ cherché, et on voit qu'il est égal au rayon d'ouverture de la loupe. Un point B est vu par l'œil; un point D, hors du champ, ne peut envoyer aucun rayon entrant dans l'œil (nous supposons que la pupille de l'œil est réduite au point F'). En pratique le champ n'est pas net sur les bords à cause des défauts des images données par la lentille pour des points éloignés de l'axe.



293. Champ de la loupe.



PUISSANCE DE LA LOUPE

■ **298. Puissance.** — Si l'on examine un même objet AB avec des loupes différentes, l'angle α' sous lequel on observe l'image sera différent, **et la** loupe sera d'autant plus puissante que, pour un même objet, l'angle α' sera plus grand.

▶ ***Définition.*** ***La puissance est mesurée en dioptries par le rapport de l'angle*** α' ***exprimé en radian à la longueur*** **AB** ***de l'objet exprimée en mètres.***

$$P_{\text{dioptrie}} = \frac{\alpha'_{\text{radian}}}{AB_{\text{mètre}}}.$$

● EXEMPLE. — *Un objet de 1 cm est vu dans la loupe sous un angle de 20°. Calculer la puissance.*

Les tables donnent : $\alpha' = 20° = 0{,}35$ **radian.**
D'autre part : **AB = 0,01 mètre**

$$P = \frac{0{,}35}{0{,}01} = 35 \text{ dioptries.}$$

299. Calcul de la puissance. — Calculons la puissance dans les deux cas suivants : l'œil est au foyer image ou l'image est rejetée à l'infini. En nous reportant aux *figures 291, 292,* nous avons :

$$\operatorname{tg}\alpha' = \alpha' = \frac{OJ}{OF'} = \frac{AB}{f}.$$

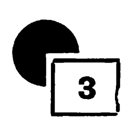
On obtient finalement :

$$\frac{\alpha'}{AB} = \frac{1}{f} \qquad \boxed{P = \frac{1}{f}.}$$

▶ *Si l'œil est au foyer image ou si l'image est rejetée à l'infini, la puissance d'une loupe est égale à sa convergence; c'est sa puissance intrinsèque; elle est pratiquement comprise entre 5 et 100 dioptries.*

¶ **Remarque 1 :** Une loupe puissante aura une petite distance focale.

¶ **Remarque 2 :** Si l'œil n'est pas au foyer, ou n'observe pas à l'infini, la puissance réelle n'est plus rigoureusement égale à la puissance intrinsèque, mais ne s'en écarte pas beaucoup dans les conditions d'observation habituelles.



GROSSISSEMENT DE LA LOUPE

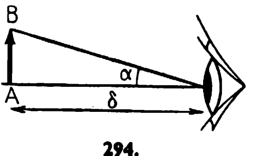
300. Grossissement. — Lorsqu'on observe l'image d'un objet à travers une loupe, on voit l'image plus grosse que si l'on regardait l'objet à l'œil nu; plus précisément, on voit l'image sous un diamètre apparent α' supérieur au diamètre apparent α de l'objet vu à l'œil nu.

▶ ***Définition.*** *Le grossissement est égal au rapport du diamètre apparent α' de l'image au diamètre apparent α de l'objet vu à l'œil nu dans les meilleures conditions, c'est-à-dire lorsque l'objet est à la distance minimum de vision distincte.*

$$\boxed{G = \frac{\alpha'}{\alpha}.}$$

Tandis que la puissance s'exprime en dioptries, le grossissement, quotient de deux angles, est un simple rapport, un nombre abstrait; il n'y a pas d'unité pour nommer G.

Si à l'œil nu on observe l'objet à une distance δ, la *figure 294* montre que l'on a : $\alpha = \frac{AB}{\delta}$ (si AB est exprimé en mètres, δ doit l'être aussi).



294.

Or on peut écrire : $G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\alpha'}{AB} \times \frac{AB}{\alpha}$

$$\boxed{G = P \times \delta}$$ (P en dioptries, δ en mètres).

Comme δ varie avec l'observateur, on convient dans le commerce, pour pouvoir cataloguer les loupes, de choisir : $\delta = 0{,}25 \text{ m} = \frac{1}{4} \text{m}$. On définit alors le ***grossissement commercial*** :

$$\boxed{G_c = \frac{P_i}{4}.}$$

▶ ***Le grossissement commercial s'exprime par un nombre égal au quart de la puissance exprimée en dioptries.***

● EXEMPLE. — *Calculer le grossissement réel pour un observateur qui ne peut voir nettement à moins de 20 cm, et le grossissement commercial d'une loupe de 4 cm de distance focale.*

La convergence de la loupe est :

$$C = P_i = \frac{1}{0{,}04} = 25 \text{ dioptries.}$$

Le grossissement pour l'observateur considéré vaut :

$$G = P \times \delta = 25 \times 0{,}20 = 5.$$

Le grossissement commercial vaut :

$$G_c = \frac{P}{4} = \frac{25}{4} = 6{,}25.$$

¶ **Remarque :** Pour qu'un observateur ait avantage à se servir d'une loupe, il faut évidemment que $G > 1$. Soit : $P \times \delta > 1$ ou $\delta > f$.

La distance focale d'une loupe doit donc toujours être inférieure à la distance minimum de vision distincte.

◇ **301. Pouvoir séparateur de la loupe.** — L'œil ne peut séparer deux points de l'image que s'il les voit sous un diamètre apparent α' au moins égal à $1' = \frac{3}{10\,000}$ radian. Si ρ est la distance des points correspondants du plan objet :

$$\rho = \frac{\alpha'}{P} = \frac{3}{10\,000\,P}.$$

Tel est le pouvoir séparateur de la loupe, distance minima de deux points du plan objet que l'œil peut distinguer à travers l'instrument :

$$\boxed{\rho = \frac{3}{10\,000\,P}}$$ (ρ en mètres, si P est en dioptries).

● EXEMPLE. — *Calculer le pouvoir séparateur d'une loupe de 2 cm de distance focale.*

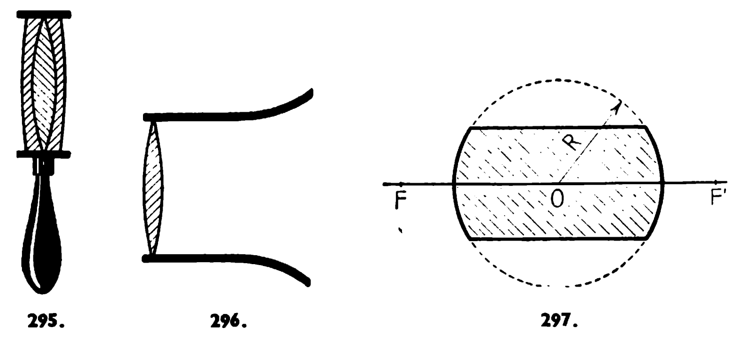
$$P = \frac{1}{0{,}02} = 50 \text{ dioptries.} \qquad \rho = \frac{3}{50 \times 10\,000} = 0{,}000\,006 \text{ m.}$$

ou : ρ = **6 microns**, soit huit fois moins qu'à l'œil nu (§ 292).

¶ **Remarque :** Ce calcul n'est valable que pour le centre du champ (approximation de Gauss).

■ 302. Usages de la loupe.

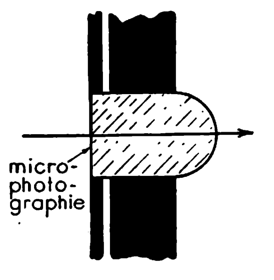
— La loupe est un instrument très répandu; peut-être en possédez-vous une : étudiez-la du point de vue de l'optique tout en apprenant votre cours. La plupart du temps la loupe est montée de façon qu'on puisse la tenir par une poignée; elle



295. 296. 297.

Différentes sortes de loupes.

peut comporter plusieurs verres accolés pour améliorer la qualité des images (*fig. 295*). Les *horlogers*, *bijoutiers*, utilisent une loupe sertie dans une monture d'ébonite qu'ils placent contre l'œil à la manière d'un monocle (*fig. 296*).



298. Loupe de **Stanhope.**

Signalons qu'il existe des systèmes plus compliqués jouant le rôle de loupes : tels sont les oculaires des instruments d'optique formés de deux lentilles non accolées. La loupe de Stanhope est un bloc de verre (*fig. 298*) monté dans des manches de porte-plume par exemple; sur la face plane est collée une microphotographie; ce système puissant donne une image virtuelle très grossie. Cette loupe est souvent utilisée par les philatélistes. La loupe de Coddington est taillée dans une sphère de verre : on démontre qu'elle est équivalente à une lentille mince convergente dont le centre optique serait en O (*fig. 297*), de distance focale 1,5 R, pour un verre d'indice 1,5.

◀ RÉSUMÉ ▶

La ***loupe*** *est une lentille convergente qui donne d'un objet réel placé entre le foyer objet et la lentille une image virtuelle de diamètre apparent plus grand, de façon à améliorer la perception des détails.*

La ***latitude de mise au point*** *est de l'ordre de quelques millimètres.*

Si l'œil voit sous un angle α' *l'image d'un objet* AB, *la* ***puissance*** *de la loupe vaut, en dioptries,* AB *étant exprimé en mètres et* α' *en radian :*

$$P = \frac{\alpha'}{AB}.$$

Si l'œil est au foyer image ou si l'objet est dans le plan focal objet, la puissance est égale à :

$$P_i = \frac{1}{f}.$$

C'est la ***puissance intrisèque.*** *Dans les autres cas, la puissance reste voisine de cette valeur.*

Le ***grossissement*** *est égal au rapport du diamètre apparent* α' *de l'image au diamètre apparent* α *de l'objet placé à la distance minimum de vision distincte :*

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha}.$$

Si P *est la puissance de la loupe,* δ *la distance minimum de vision distincte :*

$$G = P_i \times \delta.$$

Commercialement, on prend $\delta = 0{,}25$ *m ; le* ***grossissement commercial*** *a pour expression :*

$$G_c = \frac{P_i}{4}.$$

★ EXERCICES ★

254. — Un œil normal ne peut voir plus près que 25 cm. Calculer la latitude de mise au point pour une loupe de 25 dioptries, l'œil étant placé tout contre la loupe. **Rép.** : *5,5 mm.*

255. — Un œil myope peut voir les objets jusqu'à 5 cm. A partir de quelle convergence une loupe pourra-t-elle lui rendre service ? — **Rép. :** $c > 20$ *dioptries.*

256. — Un œil est placé à la distance $f + a$ d'une loupe et regarde l'image à la distance D. Montrer que la puissance est dans ce cas :

$$P = \frac{1}{f}\left(1 - \frac{a}{D}\right).$$

Que devient cette valeur pour l'œil au foyer, ou l'image à l'infini ?

257. — Quelle est la plus petite distance de 2 points du plan objet que l'œil peut séparer en utilisant une loupe de 1,6 cm de distance focale ? — **Rép.** : *4,8* microns.

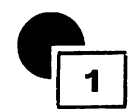
258. — On construit une loupe en accolant une lentille convergente de 2 cm de distance focale, et deux lentilles divergentes de 5 dioptries. Quels sont la puissance intrinsèque et le grossissement commercial de la loupe obtenue ?

259. — Un hypermétrope dont le « punctum proximum » se trouve à 1 mètre et un myope dont le « punctum proximum » se trouve à 12 cm utilisent une loupe de puissance 20 dioptries. Calculer le grossissement pour chaque observateur. Les comparer au grossissement commercial. — **Rép.** : *20; 2,4; 5.*

CHAPITRE XXX

LE MICROSCOPE

1. Principe du microscope.
2. Puissance et grossissement.
3. Description.



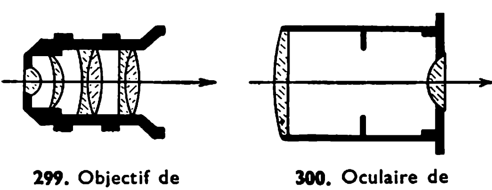
PRINCIPE DU MICROSCOPE

■ **303. Objectif et oculaire.** — Le microscope est, comme la loupe, destiné à l'observation d'objets très petits; il doit substituer à l'objet une image de diamètre apparent plus grand de façon à améliorer la perception des détails.

Les possibilités de la loupe sont limitées. Mais supposons qu'avec une loupe nous observions non pas directement l'objet, mais une image de cet objet déjà grandie γ fois par une autre lentille : la puissance du système sera γ fois plus grande que celle de la loupe seule : nous aurons un microscope. Pour que l'appareil ne soit pas trop encombrant, et que le grandissement γ soit suffisant, il est nécessaire que l'autre lentille ait une très petite distance focale.

▶ ***Principe du microscope** : un système très convergent appelé objectif donne de l'objet à observer une image très agrandie; celle-ci est examinée par l'œil à l'aide d'un oculaire jouant le rôle de loupe.*

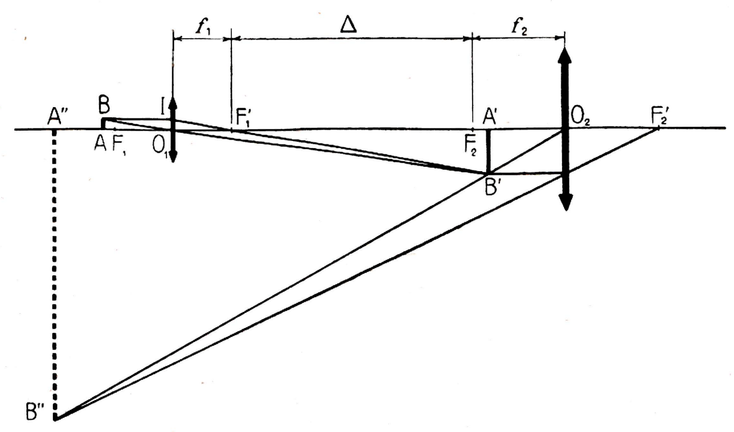
Nous représenterons l'objectif par une seule lentille; en réalité il en comporte plusieurs : le système est très convergent (*fig. 299*), il a pour distance focale quelques millimètres. Nous représenterons l'oculaire par une loupe; il comporte en réalité deux lentilles (*fig. 300*); un premier verre, appelé verre de champ, collecte les rayons issus de l'objectif et les rabat vers le verre de l'œil. L'ensemble équivaut à une loupe de distance focale de l'ordre du centimètre.



299. Objectif de microscope.

300. Oculaire de microscope.

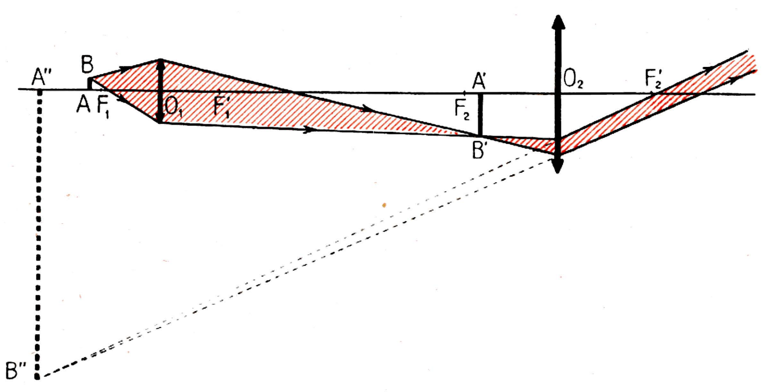
■ **304. Construction de l'image.** — D'un petit objet AB (*fig. 301*) l'objectif O_1, de distance focale f_1, donne une image réelle et renversée A'B', γ fois plus grande que AB. C'est cette image intermédiaire



301. Construction des images dans le microscope.

qui sert d'objet pour l'oculaire O_2, de distance focale f_2, fonctionnant comme loupe; elle est placée entre le foyer objet F_2 de l'oculaire et la lentille; l'oculaire en donne une image virtuelle définitive A″B″, droite par rapport à A'B', mais renversée par rapport à l'objet initial AB.

▶ *Le microscope renverse les images.*



302. Marche d'un faisceau lumineux.

La figure **302** montre la marche d'un faisceau lumineux issu du point B et couvrant tout l'objectif. On voit qu'un faisceau très délié tombe sur l'oculaire, et que le faisceau émergent rencontre l'axe très près de F'_2. C'est là qu'il faudra placer l'œil pour recevoir toute la lumière :

au *point oculaire.* Ce point, très près de F'_2, oblige donc l'œil à se trouver pratiquement au foyer image de la loupe oculaire.

▶ *L'oculaire fonctionne toujours pratiquement avec sa puissance intrinsèque :* $p = \frac{1}{f_2}$.

■ 305. Latitude de mise au point. — L'objectif et l'oculaire sont fixés à chaque extrémité d'un tube de longueur fixe, 16 à 20 cm.

$$l = O_1O_2 = O_1F'_1 + F'_1F_2 + F_2O_2.$$

La distance $F'_1F_2 = \Delta$ s'appelle ***intervalle optique.*** On a : $l = f_1 + \Delta + f_2$.

La mise au point se fait alors en déplaçant l'ensemble des deux lentilles par rapport à l'objet.

Nous savons que la latitude de mise au point de la loupe est de l'ordre du centimètre. L'oculaire étant une loupe, cela veut dire que A'B' peut se déplacer au plus d'environ 1 cm; mais le grandissement de l'objectif étant considérable, cela correspond à un déplacement possible de AB extrêmement petit, *de l'ordre du centième de millimètre.*

La mise au point dans le microscope doit se faire de façon très précise, à l'aide d'une vis micrométrique par exemple. Il existe en général un bouton de mise au point rapide, à crémaillère, puis un bouton donnant un déplacement très lent pour terminer cette mise au point *(fig. 305).*

● EXEMPLE. — *Un microscope de 18 cm de long possède un objectif de 5 mm de distance focale et un oculaire de 2 cm de distance focale. Calculer la latitude de mise au point pour un œil normal pouvant accommoder jusqu'à 20 cm, et placé contre l'oculaire.*

Quand l'œil observe à l'infini, l'image intermédiaire est au foyer objet de l'oculaire, donc à 16 cm de l'objectif. L'objet s'en trouve alors à une distance p_1 telle que :

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{160} = \frac{1}{5} \qquad \text{d'où} \qquad p_1 = \frac{5 \times 160}{155} = \frac{160}{31} \text{ mm.}$$

Quand l'œil observe à **20 cm**, l'image intermédiaire se trouve à une distance x de l'oculaire telle que :

$$\frac{1}{x} - \frac{1}{200} = \frac{1}{20} \qquad \text{d'où} \qquad x = \frac{200}{11} \text{ mm}$$

Cette image est à la distance de l'objectif :

$$p'_2 = 180 - \frac{200}{11} = \frac{1\,780}{11} \text{ mm.}$$

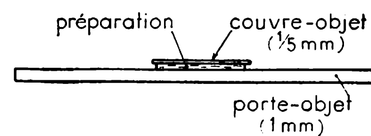
L'objet est alors à une distance p_2 de l'objectif telle que :

$$\frac{1}{p_2} + \frac{1}{p'_2} = \frac{1}{5}, \qquad \frac{1}{p_2} = \frac{1}{5} - \frac{11}{1\,780}, \qquad \text{soit :} \qquad p_2 = \frac{356}{69} \text{ mm.}$$

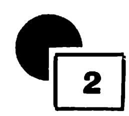
La latitude de mise au point cherchée est :

$$\lambda = p_1 - p_2 = \frac{160}{31} - \frac{356}{69} = 0{,}0019 \text{ mm} \qquad \text{soit} \qquad 1{,}9 \text{ micron.}$$

306. Préparation de l'objet. — Il résulte de l'extrême petitesse de la latitude de mise au point, que la profondeur de champ du microscope sera très faible; d'où la nécessité d'observer une tranche mince d'objet, que l'on pourra éclairer par transparence. Ces lamelles se découpent à l'aide d'un microtome, et se placent entre deux plaques de verre : le porte-objet, et le couvre-objet (*fig. 303*).



303. Porte-objet et couvre-objet.



PUISSANCE ET GROSSISSEMENT

307. Puissance du microscope. — La puissance se définit comme pour la loupe : $P = \frac{\alpha'}{AB}$ (α' en radians, AB en mètres, P en dioptries). Si on examinait directement l'objet avec la loupe-oculaire, on aurait une puissance p; mais l'objet est grandi γ fois par l'objectif; il est évident que la puissance est γ fois plus grande :

$$P = p \times \gamma.$$

▶ *La puissance du microscope est égale à la puissance de l'oculaire multipliée par le grandissement de l'objectif.*

¶ **Remarque** : On peut d'ailleurs écrire :

$$P = \frac{\alpha'}{AB} = \frac{\alpha'}{A'B'} \times \frac{A'B'}{AB} = p \times \gamma.$$

308. Puissance intrinsèque. — Dans le cas où l'œil observe à l'infini, A' est en F_2 (*fig. 301*). Le grandissement de l'objectif s'écrit :

$$\gamma = \frac{A'B'}{AB} = \frac{A'B'}{O_1I} = \frac{F_1'F_2}{O_1F_1'} = \frac{\Delta}{f_1}.$$

Comme $p = \frac{1}{f_2}$, la formule $P = p\gamma$ donne :

$$P_i = \frac{\Delta}{f_1 f_2}$$ (les longueurs en mètres, P en dioptries).

La puissance réelle (lorsqu'on ne met pas au point à l'infini) ne s'écarte jamais beaucoup de la puissance intrinsèque.

Un bon microscope possède un jeu d'objectifs et d'oculaires dont les combinaisons deux à deux permettent d'obtenir diverses puissances. Celles-ci varient ordinairement de 100 à 2 500 dioptries. Dans certains cas particuliers, on peut aller jusqu'à 5 000 dioptries.

● EXEMPLE. — *Un microscope est caractérisé par :*

distance focale de l'objectif : $f_1 = 4$ *mm*
distance focale de l'oculaire : $f_2 = 2$ *cm*
longueur du tube : $l = 16{,}4$ *cm.*

Calculer sa puissance intrinsèque, ainsi que le grandissement de l'objectif.

L'intervalle optique vaut :

$$\Delta = 16{,}4 - 2 - 0{,}4 = 14 \text{ cm.}$$

La puissance intrinsèque est donnée par :

$$P_i = \frac{\Delta}{f_1 f_2} = \frac{0{,}14}{0{,}02 \times 0{,}004} \quad \text{soit } 1\,750 \text{ dioptries.}$$

La puissance de l'oculaire est :

$$p = \frac{1}{0{,}02} = 50 \text{ dioptries.}$$

Le grandissement de l'objectif vaut :

$$\gamma = \frac{P}{p} = \frac{1\,750}{50} \quad \text{soit} \quad \gamma = 35.$$

■ **309. Grossissement.** — Tout ce que nous avons dit à propos de la loupe est encore valable. Le *grossissement,* défini par $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$, vaut encore :

$$\boxed{G = P \times \delta} \quad \text{(P en dioptries, } \delta \text{ en mètres).}$$

Le *grossissement commercial* a pour expression :

$$\boxed{G_c = \frac{P_i}{4}.}$$

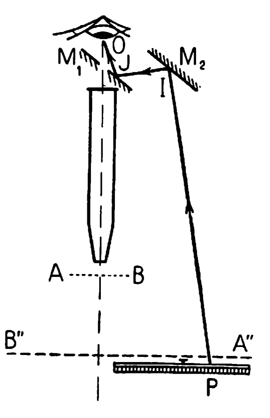
● EXEMPLE. — *Avec les données de l'exemple précédent, calculer le grossissement commercial, et le grossissement réel pour un observateur myope dont la distance minimum de vision distincte est de 10 cm.*

Les relations précédentes donnent :

$$G_c = \frac{1\,750}{4} \quad \text{soit} \quad G_c = 437{,}5$$

$$G = 1\,750 \times 0{,}10 \qquad G = 175.$$

◇ **310. Chambre claire.** — On peut mesurer la puissance d'un microscope (et par conséquent en déduire le grossissement) à l'aide d'une *chambre claire.* C'est une sorte de petit périscope que l'on fixe sur l'oculaire, et que l'on peut schématiser par deux miroirs plans M_1 et M_2 (*fig. 304*) inclinés à 45°. Le miroir M_1 est percé d'un trou permettant à l'œil O de voir dans le microscope; mais en même temps, par le jeu des miroirs, l'œil voit un double décimètre posé



304. Méthode de la **chambre claire.**

sur la table (rayons tels que PIJO). On examine alors l'objet AB constitué par un micromètre objectif au $\frac{1}{100}$ de mm (microphotographie portant 100 traits par mm), et l'on voit son image A″B″ très grandie; on s'arrange pour qu'elle se trouve au même niveau que le double décimètre. Supposons que l'image de $\frac{1}{100}$ mm nous paraisse se superposer à n cm du double décimètre.

$$AB = \frac{1}{100} \text{ mm} = 0{,}00001 \text{ mètre.}$$

Si D est la distance de l'œil au double décimètre (OJIP) :

$$\alpha' = \frac{n}{D}.$$

D'où :

$$P = \frac{\alpha'}{AB} = \frac{n}{0{,}00001 \times D}.$$

Si par exemple $n = 0{,}5$; $D = 20$ cm, on aurait :

$$P = \frac{0{,}5}{0{,}00001 \times 20} \text{ soit : } 2\,500 \text{ dioptries.}$$

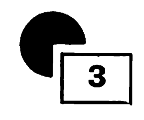
◇ **311. Pouvoir séparateur.** — En répétant ce que nous avons dit pour la loupe, on obtient :

$\rho = \frac{3}{10\,000\,P}$, P étant maintenant la puissance du microscope. Si on fait P = 1 500 dioptries, on a :

$$\rho = \frac{3}{10\,000 \times 1\,500} = \frac{1}{5\,000\,000} \text{ mètre, soit : } \rho = 0{,}2 \text{ micron.}$$

Par suite de phénomènes dus à la nature même de la lumière, on ne peut jamais séparer deux points plus rapprochés que 0,2 μ. Une puissance supérieure à 1 500 dioptries ne donnera pas plus de détails; on verra seulement l'image sous un diamètre apparent plus grand, et l'œil se fatiguera moins.

¶ **Remarque :** La puissance P intervenant dans la formule $\rho = \frac{3}{10\,000\,P}$ s'appelle la puissance utile.



DESCRIPTION

◇ **312. Éclairage de la préparation.** — L'image est très grande par rapport à l'objet; la lumière émise par celui-ci se répartit sur une grande étendue, et l'image est très peu lumineuse : on dit que la clarté du microscope est très petite. Pour voir quelque chose, il faut éclairer fortement l'objet, en général par transparence. A l'aide d'un *miroir*, on dirige dans l'axe de l'appareil la lumière d'une source extérieure; on peut encore placer sous le microscope un *projecteur* spécial branché sur une prise de courant. Un condenseur de

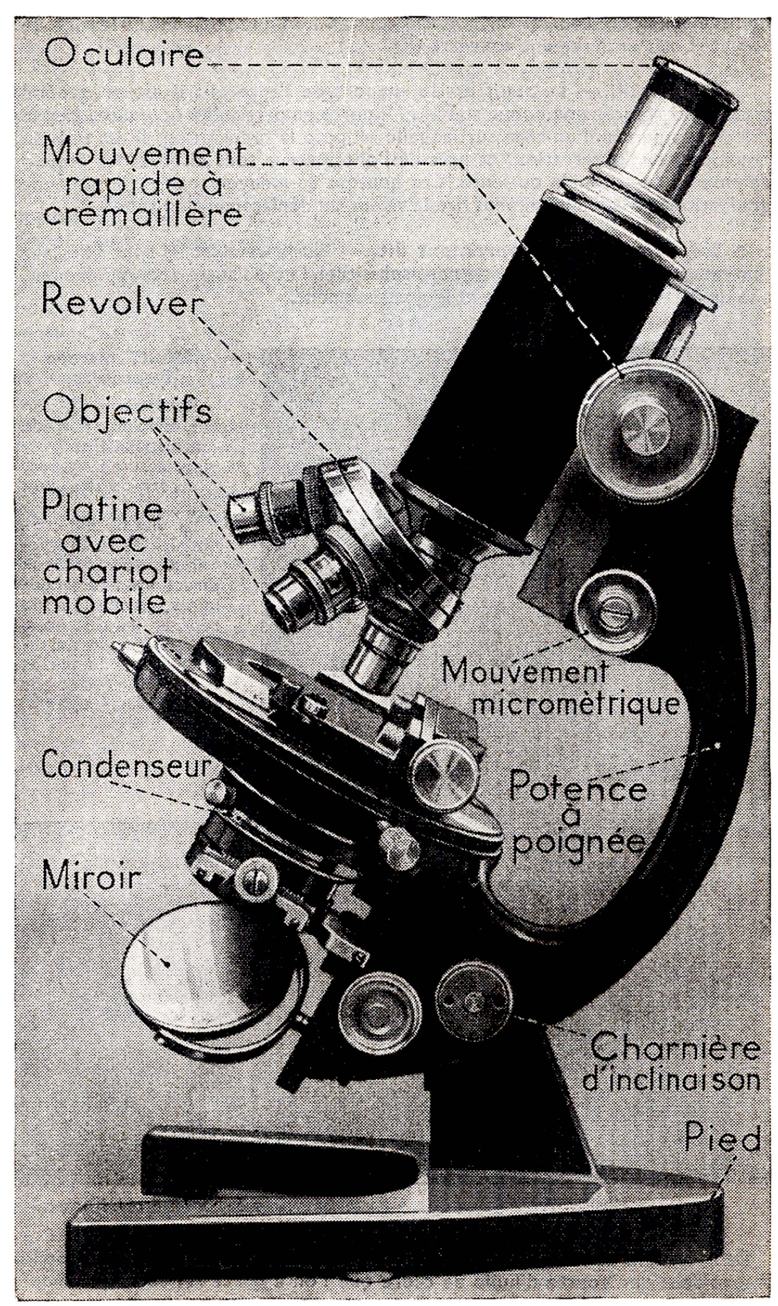


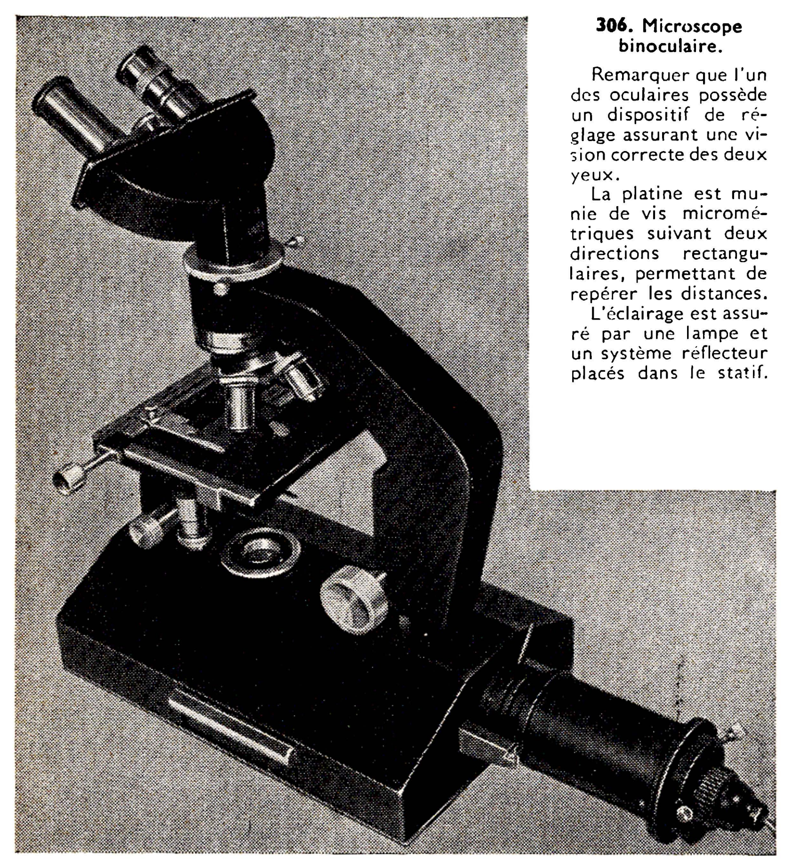
Photo Hachette.

305. Microscope.

lumière concentre celle-ci sur la *préparation*; il faut que la première lentille de l'objectif soit entièrement couverte (*fig. 305*).

◇ **313. Statif.** — Le *statif* est le support de l'appareil; il est en général lourd pour assurer une bonne stabilité. Il porte en particulier la *platine*, plaque métallique percée d'un trou sur laquelle on pose la préparation. Il est articulé pour faciliter l'observation, et près de l'observateur sont disposés les *boutons de mise au point* rapide ou lente. Ces boutons se meuvent parfois devant une graduation sur laquelle on peut lire la valeur du déplacement du tube.

◇ **314. Microscope proprement dit.** — Plusieurs *objectifs* sont fixés sur une monture à *barillet*, que l'on peut substituer l'un à l'autre très rapidement, afin de faire varier la puissance et le grossissement.



306. Microscope binoculaire.

Remarquer que l'un des oculaires possède un dispositif de réglage assurant une vision correcte des deux yeux.

La platine est munie de vis micrométriques suivant deux directions rectangulaires, permettant de repérer les distances.

L'éclairage est assuré par une lampe et un système réflecteur placés dans le statif.

Photo communiquée par les Établ. Nachet.

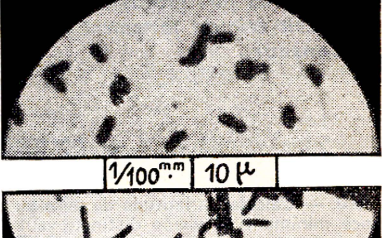
Dans certains cas on emploie un *objectif à immersion*, dont la lentille frontale baigne dans une goutte d'huile de cèdre que l'on a posée sur la préparation. La clarté et le pouvoir séparateur s'en trouvent améliorés. Un objectif peut comporter de 3 à 7 lentilles (*fig. 299*).

L'oculaire est formé de deux lentilles (*fig. 300*) et son tube est simplement entré à frottement doux dans le microscope, de sorte que les différents oculaires sont facilement interchangeables.

Un oculaire peut porter, dans le plan de l'image intermédiaire A'B', une division micrométrique : *micromètre oculaire*, qui sera donc vue nettement en même temps que l'image définitive, et avec laquelle on pourra effectuer des mesures de longueur.

◇ **315. Autres microscopes.** — Si l'on veut observer la surface d'un corps opaque, on éclaire la préparation par-dessus. On peut munir le microscope d'une *chambre photographique*, et, en modifiant la mise au point, produire une image réelle sur la pellicule sensible : on obtient ainsi des *photomicrographies* (*fig. 307*). Les naturalistes utilisent des microscopes à *vision binoculaire*, comportant deux oculaires, et parfois deux objectifs : on obtient une sensation de relief très accentuée (*fig. 306*).

Avec un dispositif particulier d'éclairage, le microscope permet d'apercevoir brillantes sur fond noir, des particules *ultramicroscopiques* de dimensions bien inférieures au pouvoir séparateur de l'instrument; on ne distingue donc pas leurs formes; elles apparaissent comme des points analogues aux étoiles par une nuit claire.



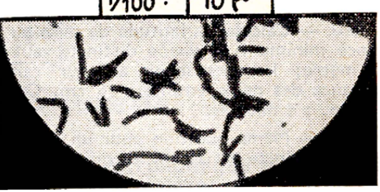


Photo Hachette.

307. Vibrion du (choléra en haut.) Bacilles de la diphtérie (en bas).

Dans le *microscope électronique*, on remplace la lumière ordinaire par des grains d'électricité, ou électrons, et les lentilles par des bobines parcourues par un courant; certaines jouent le rôle d'objectif, d'autres le rôle d'oculaire. Le grossissement obtenu est de l'ordre de 100 000.

◀ RÉSUMÉ ▶

Dans le ***microscope,*** *on observe avec un* ***oculaire*** *jouant le rôle de loupe une image réelle et très agrandie de l'objet donnée par l'****objectif;*** *l'image finale virtuelle est renversée.*

La ***latitude de mise au point*** *est de l'ordre du centième de millimètre; la mise au point nécessite un dispositif mécanique sensible.*

La ***puissance*** *du microscope est :*

$$P = p \times \gamma.$$

Elle ne s'écarte jamais beaucoup de la ***puissance intrinsèque :***

$$P_i = \frac{\Delta}{f_1 f_2}.$$

Le **grossissement** est :

$$G = P \times \delta$$

et le **grossissement commercial vaut :**

$$G_c = \frac{P_i}{4}.$$

Le microscope ne permet pas de ***séparer*** *deux points distants de moins de 0,2 μ.*

A cause du fort grossissement, ***l'image finale est peu lumineuse,*** *et on doit éclairer fortement l'objet par un miroir concave ou par un* ***condenseur.***

★ EXERCICES ★

260. — Calculer la latitude de mise au point pour un observateur dont la distance minimum de vision distincte vaut 10 cm et le maximum de vision distincte 1 mètre; le microscope a pour caractéristiques : $f_1 = 5$ mm; $f_2 = 20$ mm; distance des deux lentilles : 16 cm. On supposera l'œil placé contre l'oculaire.
Rép. : *4 microns.*

261. — Même question pour un observateur à œil normal dont le minimum de vision distincte est 20 cm, et qui utilise le même microscope.

262. — Calculer la puissance du microscope précédent et déterminer pour chaque observateur précédent le grossissement du microscope; comparer ces grossissements au grossissement commercial. — **Rép.** : *1 381; 1 350 dioptries; 138; 270; 337,5.*

263. — Un observateur regarde à l'infini, avec le microscope précédent, l'image d'un micromètre objectif au 1/100 mm; sous quel angle verra-t-il les images de deux traits voisins de la graduation?

264. — **Méthode du duc de Chaulnes.** Un microscope est pointé sur une feuille de papier portant des dessins repères. On pose sur cette feuille une lame de verre à faces parallèles; pour voir encore nettement les dessins il faut soulever le microscope de 0,52 mm; enfin, pour pointer la face supérieure de la lame, il faut de nouveau soulever le microscope de 1,06 mm. Calculer l'indice du verre. — **Rép.** : *1,49.*

265. — Le même microscope que dans les exercices précédents est réglé pour la vision à l'infini et pointé sur un objet de 0,1 mm de diamètre.

Dans quel sens et de combien faut-il modifier la mise au point pour obtenir une image réelle sur une pellicule photographique tendue à 8 cm derrière l'oculaire? Quel est le diamètre de la photographie?

266. — Un microscope a les caractéristiques suivantes : distance focale de l'objectif, 8 mm; intervalle optique, 16 cm; puissance de l'oculaire, 40 dioptries. Calculer sa puissance intrinsèque, son grossissement commercial. Quelle est la plus petite distance de deux points séparés par l'ensemble œil-instrument sachant que l'œil ne peut séparer deux points images dont la distance angulaire est inférieure à 3×10^{-4} radian?
Rép. : *800 dioptries; 200; 0,37 μ.*

CHAPITRE XXXI

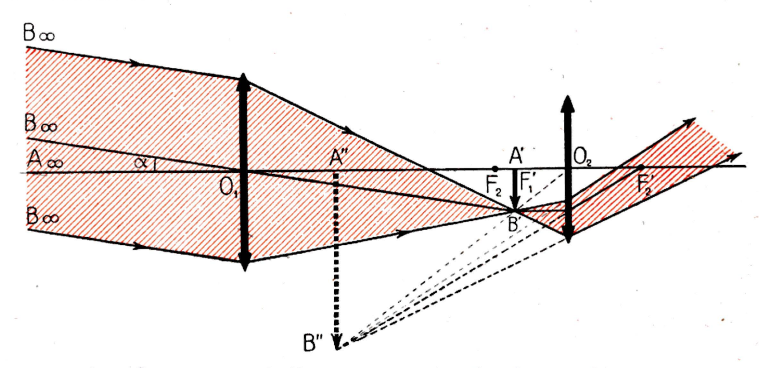
LUNETTE ASTRONOMIQUE

1. Principe de la lunette.
2. Grossissement.
3. Description.



PRINCIPE DE LA LUNETTE

■ **316. Objectif et oculaire.** — La lunette astronomique est destinée à l'observation des astres. Elle leur substitue une image virtuelle de plus grand diamètre apparent; la visibilité des détails s'en trouve améliorée. Elle se compose de deux systèmes optiques, un ***objectif*** et un ***oculaire***.

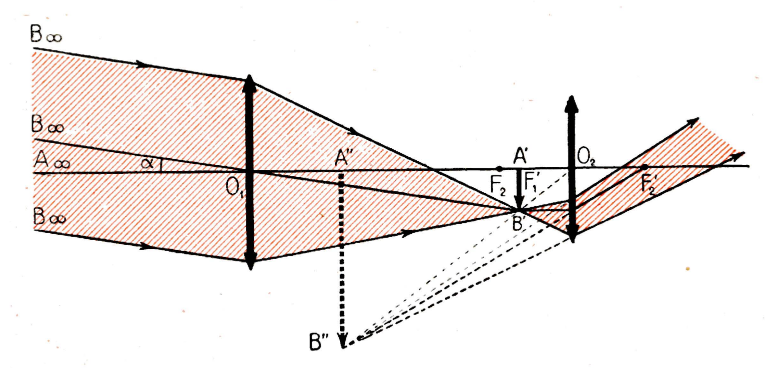


308. Construction de l'image et marche d'un faisceau lumineux.

L'objectif est un système assimilable à une lentille mince convergente de grande distance focale, de 1 m à 20 m; de l'objet à l'infini, il donne une image réelle dans son plan focal image. Il faut que cette image soit aussi grande que possible, d'où la nécessité de prendre une grande distance focale pour l'objectif ($A'B' = F \times \alpha$) (*fig. 308*).

Cette image est observée au moyen d'un oculaire analogue à celui du microscope; cet oculaire joue le rôle de loupe.

■ 317. Construction de l'image. — D'un astre AB vu de la Terre sous un diamètre apparent α (*fig. 308*), l'objectif O_1 donne une image renversée $A'B' = F \times \alpha$, située dans son plan focal image, F étant la



308. Construction de l'image et marche d'un faisceau lumineux.

distance focale de cet objectif; A'B' doit se trouver entre le foyer objet F_2 de la loupe et cette lentille, qui en donne l'image finale A″B″, virtuelle, droite par rapport à A'B', mais finalement renversée par rapport à AB.

▶ *La lunette astronomique renverse les images.*

La figure indique aussi la marche d'un faisceau provenant du bord B de l'astre.

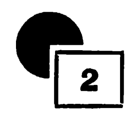
Le point B envoie sur l'objectif O_1 un faisceau de lumière parallèle qui est transformé en un faisceau convergent au point B' du plan focal image. Ce point est situé à l'intersection du rayon incident passant par le centre optique O_1 avec le plan focal image. Les rayons divergent ensuite de B', rencontrent l'oculaire et semblent venir de B″, image réelle observée.

■ 318. Latitude de mise au point. — La mise au point s'effectue en déplaçant l'oculaire par rapport à l'image objective, tout comme une loupe; elle est donc de l'ordre du centimètre, et le réglage se fera soit à la main, soit à l'aide d'une simple crémaillère entraînée par un pignon.

Si l'observateur examine l'image définitive à l'infini, c'est que l'image intermédiaire A'B', déjà au foyer image de l'objectif, est également au foyer objet de l'oculaire.

▶ **Définition.** *La lunette est dite* ***afocale*** *lorsque le foyer image de l'objectif coïncide avec le foyer objet de l'oculaire; l'image d'un objet à l'infini est elle-même à l'infini.*

Désormais nous nous placerons toujours dans ce cas.

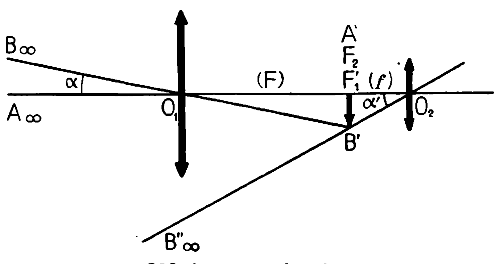


GROSSISSEMENT

319. Définition et valeur du grossissement. — Un astre étant vu à l'œil nu sous un diamètre apparent α, la lunette en donne une image virtuelle que l'œil observe sous un diamètre apparent $\alpha' > \alpha$.

▶ ***Définition.*** *On appelle grossissement de la lunette le rapport du diamètre apparent de l'image au diamètre apparent de l'objet.*

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha}.$$



309. Lunette **afocale.**

Plaçons-nous dans le cas d'une lunette afocale (*fig. 309*). Les foyers F'_1, F_2 sont confondus avec A'. Soit F la distance focale de l'objectif, f celle de l'oculaire.

Dans le triangle $O_1A'B'$, on a, α étant petit :

$$A'B' = F \times \alpha.$$

De même dans le triangle $A'B'O_2$, α' étant petit :

$$A'B' = f \times \alpha'.$$

On en tire :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{F}{f}.$$

$$G = \frac{F}{f}.$$

¶ **Remarque :** $\frac{1}{f}$ étant la puissance intrinsèque p_i de l'oculaire, on peut aussi écrire :

$$G = F \times p_i \text{ (F en mètres, } p_i \text{ en dioptries).}$$

EXEMPLE. — *Une lunette afocale a 102 cm de long; l'oculaire a une puissance de 50 dioptries. Calculer le grossissement.*

La longueur de la lunette est :

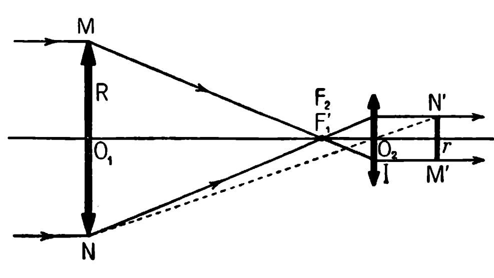
$$F + f = 102 \text{ cm}.$$

Mais : $f = \frac{1}{50}$ **mètre = 2 cm.** Donc : **F = 100 cm.**

Le grossissement est :

$$G = \frac{100}{2} = 50.$$

■ **320. Cercle oculaire.** — L'oculaire, lentille convergente, donne de l'objectif MN une image réelle M'N' appelée *cercle oculaire*. Tous les rayons traversant l'objectif et rencontrant l'oculaire passent donc dans le cercle oculaire. En particulier, un incident en M parallèle à l'axe se réfracte en passant par F'_1, qui est aussi F_2; il sort donc parallèlement à l'axe en passant par M'. D'autre part, NO_2N' sont alignés (*fig. 310*) ce qui donne la position de M'N'. Les triangles $O_1MF'_1$ et $O_2IF'_1$ étant semblables :



310. Cercle oculaire.

$$\frac{R}{r} = \frac{O_1F'_1}{F'_1O_2} = \frac{F}{f}$$

donc :

$$\boxed{G = \frac{R}{r}.}$$

¶ **Remarque :** Pour recevoir le plus de lumière possible, l'œil devra se placer au cercle oculaire; cette position lui est imposée par un *œilleton*. Le cercle oculaire est très près du foyer image de l'oculaire, car l'objectif peut être considéré comme très loin de l'oculaire (par rapport à la distance focale de celui-ci). L'oculaire fonctionne alors pratiquement avec sa puissance intrinsèque.

■ **321. Mesure du grossissement.** — On pourrait mesurer F et f; en général F est connu, car une lunette ne possède qu'un seul objectif, très coûteux. On peut lui associer des oculaires de puissances variées p; le grossissement est alors $G = F \times p$. Pour une mesure complète, on détermine le rayon R de l'objectif, puis le rayon r du cercle oculaire; à cet effet on déplace derrière l'oculaire (la lunette étant tournée vers le ciel) un écran portant des graduations millimétriques, jusqu'à obtenir une image nette de l'objectif. On lit le diamètre $2r$, et on calcule $G = \frac{R}{r}$.

Dans les plus grosses lunettes, le grossissement peut atteindre plusieurs milliers.

◇ **322. Pouvoir séparateur.** — L'œil ne peut distinguer deux points de l'image que s'il les voit sous un diamètre apparent au moins égal à $\alpha' = 1'$. A ces deux points images correspondent deux points objets tels que leur distance angulaire α est donnée par la relation :

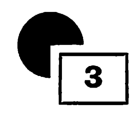
$$\alpha = \frac{\alpha'}{G} = \frac{1'}{G}.$$

En fait la nature ondulatoire de la lumière limite cette distance angulaire à une valeur :

$$\alpha_{(\text{minutes})} = \left(\frac{1}{R_{mm}}\right).$$

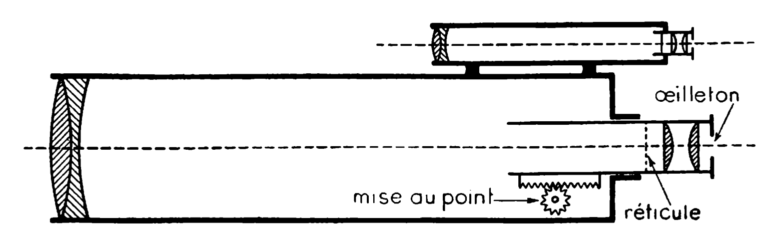
¶ **Remarques : 1.** Il n'est pas question de puissance dans la lunette astronomique. L'objet AB est pratiquement infiniment grand, α' est assez petit, et $P = \frac{\alpha'}{AB}$ est infiniment petit.

2. Les ***images des étoiles*** nous apparaissent toujours dans la lunette comme des points. Cependant l'objectif, beaucoup plus grand que la pupille de l'œil, reçoit plus de lumière : les étoiles nous apparaissent plus brillantes et on peut les observer en plein jour.



DESCRIPTION

◇ 323. Lunette proprement dite. — **L'*objectif* (*fig. 311*) est formé de 2 lentilles quelquefois accolées, pour améliorer la qualité des images. L'*oculaire* est formé de deux lentilles non accolées, en arrière desquelles se trouve l'*œilleton*, obligeant l'œil à se placer au cercle oculaire. Le tube porte-oculaire est muni d'une crémaillère pour la mise au point. Le tube de la lunette peut être très long; il est noirci intérieurement pour éviter des reflets.**



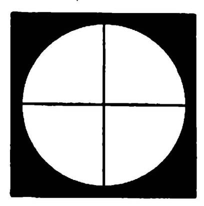
311. Lunette et chercheur.

La plus grosse lunette est celle de l'observatoire *Yerkes* aux États-Unis; celle de l'observatoire de *Meudon* est la 3ᵉ, mais sa qualité est exceptionnelle.

Voici quelques caractéristiques des lunettes de Meudon et de Yerkes :

	Diamètre de l'objectif.	Distance focale de l'objectif.	Grossissement maximum utilisé.
Lunette de Yerkes. . . .	102 cm	19,2 mètres	3 000
Lunette de Meudon. . . .	82 cm	16,2 mètres	2 500

◇ 324. Réticule; axe optique. — **Dans le plan de l'image intermédiaire donnée par l'objectif, en avant de l'oculaire, on place deux fils fins (de métal**

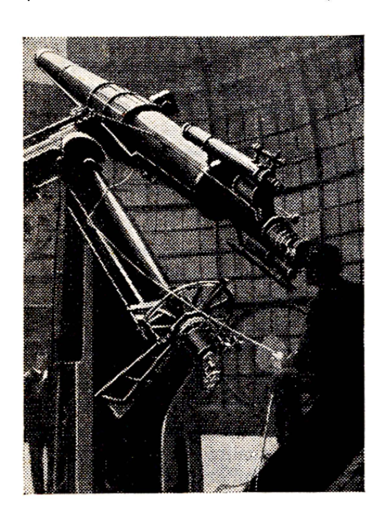


312. Réticule.

ou fils d'araignée) tendus en croix : c'est le *réticule*, que l'on verra nettement en même temps que l'astre ou l'étoile (*fig. 312*). On peut donc viser un point lumineux, et mesurer par exemple la distance angulaire de deux étoiles, le diamètre apparent de la lune, etc. Pour passer d'une visée à l'autre il faudra faire tourner la lunette de l'angle cherché, que l'on peut lire sur le support de la lunette à l'aide d'un dispositif approprié. L'axe optique est défini par la droite joignant le centre optique de l'objectif et le point de croisée des fils du réticule.

◇ **325. Champ; chercheur.** — La région du ciel vue dans une lunette astronomique (champ de la lunette) est d'autant plus restreinte que le grossissement de la lunette est plus grand. Il est alors difficile de se repérer, et de diriger la lunette vers un point donné. On fixe sur le tube de la lunette une seconde lunette plus petite, de plus faible grossissement, et par conséquent de plus grand champ : c'est le *chercheur*, dont l'axe optique est bien parallèle à celui de la lunette. On amène l'image de l'astre au centre du champ du chercheur; elle se trouve alors dans le champ de la lunette.

¶ **Remarque :** Dans le cas de forts grossissements, l'astre visé sort bientôt du champ de la lunette, par suite du mouvement de rotation de la terre. La lunette est alors montée en *équatorial*, et un mouvement d'horlogerie l'entraîne de telle façon que l'astre reste dans le champ (*fig. 311*).



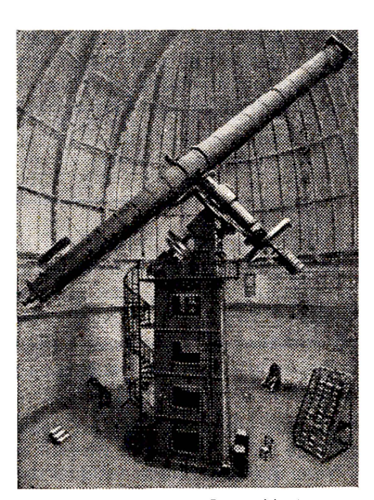


Photo Hachette.

313. Lunettes montées en **équatorial**.

A gauche, le grand équatorial de l'observatoire de Paris. — A droite, la lunette de l'observatoire Yerkes (États-Unis).

◇ **326. Autres dispositifs.** — On peut disposer en arrière de l'oculaire une chambre photographique, et modifier le tirage de l'oculaire pour obtenir une image réelle sur la pellicule sensible.

Les *télescopes* fonctionnent comme les lunettes, mais l'objectif est remplacé par un miroir concave donnant une image de l'astre dans son plan focal, qu'on examine ensuite avec un oculaire.

Les lunettes sont utilisées de préférence aux télescopes dans l'astronomie de position; on donne à ces lunettes des dimensions relativement faibles, abandonnant ainsi les très grandes lunettes comme celle de Meudon.

Les télescopes sont préférés aux lunettes dans l'astronomie physique : étude des spectres de la lumière émise par les astres, photographie des étoiles. L'emploi de miroirs paraboliques permet d'utiliser de très grandes ouvertures et de collecter ainsi un très grand flux lumineux.

◀ RÉSUMÉ ▶

Dans la ***lunette astronomique*** *on observe, avec un* ***oculaire*** *jouant le rôle de loupe, l'image d'un objet à l'infini qu'un* ***objectif de grande distance focale*** *donne dans son plan focal image.*

La lunette est dite ***afocale*** *lorsque le foyer image de l'objectif coïncide avec le foyer objet de l'oculaire*

Le grossissement de la lunette est égal au quotient du diamètre apparent α' de l'image au diamètre apparent α de l'objet :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha}.$$

Le ***grossissement*** *de la lunette afocale est donné par :*

$$G = \frac{F}{f} \quad \text{ou} \quad \frac{R}{r}.$$

où F et f sont les distances focales de l'objectif et de l'oculaire; R et r sont les rayons de l'objectif et du cercle oculaire.

Les grosses lunettes sont munies d'un ***chercheur,*** *destiné à amener dans le champ de la lunette l'astre que l'on veut observer.*

Le point de croisée des fils du ***réticule*** *permet d'effectuer des visées, et par suite des mesures d'angles si l'on peut évaluer l'angle de rotation de la lunette.*

★ EXERCICES ★

267. — Une lunette réglée pour l'infini a 1,82 m de longueur. On observe une planète de diamètre apparent 20″ et on la voit aussi grosse que la lune à l'œil nu (30′). Calculer les distances focales de l'objectif et de l'oculaire.
Rép. : *F = 180 cm; f = 2 cm.*

268. — Une lunette réglée pour l'infini a un objectif de 1 m de distance focale et de rayon d'ouverture 2 cm; elle grossit 50 fois. Calculer la position du cercle oculaire par rapport à l'objectif, ainsi que le rayon de ce cercle.

269. — L'objectif de la lunette de Meudon a 83 cm de diamètre. Quel est son pouvoir séparateur théorique? Quel est le grossissement de cette lunette qui permet à l'œil dont le pouvoir séparateur est de 3×10^{-4} radian d'utiliser ce pouvoir séparateur? Quel est le grossissement utile? Quelle est la distance focale de l'oculaire qui donne ce grossissement, la distance focale de l'objectif étant de 16,2 m? — **Rép.** : *0,145″; 415; 3,9 cm.*

270. — Une lunette fonctionne avec un grossissement de 800. Le pouvoir séparateur de l'œil étant $1' = \frac{3}{10\,000}$ radian, quelle est la plus petite distance de deux points de la lune que l'on peut distinguer? Distance de la terre à la lune : 60 rayons terrestres.

Circonférence de la terre : 40 000 kilomètres.

271. — Une lunette caractérisée par F = 2 mètres, $f = 2$ cm, est réglée pour l'infini. Dans quel sens et de combien doit-on modifier la position de l'oculaire pour recevoir une image réelle du soleil sur un écran situé à 22 cm de l'oculaire? Quel est le diamètre de cette image, sachant que le diamètre apparent du soleil est de 30'? — **Rép.** : *allonger de 2 mm; 18 cm.*

272. — La lunette précédente est de nouveau réglée pour l'infini; dans quel sens et de combien un observateur qui accommode à 25 cm doit-il modifier la position de l'oculaire? On supposera que l'observateur a l'œil contre l'oculaire.

273. — La lunette précédente est de nouveau réglée pour l'infini; le diamètre de l'oculaire est 2 cm. Calculer l'angle que font entre eux les rayons extrêmes passant par le centre optique de l'objectif et pouvant rencontrer l'oculaire. Cet angle mesure le champ moyen de la lunette. Quelle est la valeur du champ dans l'espace image? On dirige la lunette sur un rideau d'arbres situés à 5,5 km. Quelle longueur de ce rideau verra-t-on? — **Rép.** : *34'; 56°40'; 54,5 m.*

274. — Calculer la latitude de mise au point d'une lunette dont l'oculaire a une puissance de 50 dioptries :

1° pour un œil normal,

2° pour un myope dont les limites de vision distincte sont 50 cm et 10 cm.

3° pour un hypermétrope dont les limites de vision distincte sont — 100 cm et 40 cm.

275. — Une lunette astronomique comprend un objectif de 1 m de distance focale et un oculaire de 50 dioptries. Quels sont son grossissement et sa longueur lorsqu'elle est afocale?

On veut redresser l'image sans modifier le grossissement en intercalant entre l'objectif et l'oculaire une lentille convergente de 5 cm de distance focale. Où faut-il la placer? Quelle est la nouvelle longueur de la lunette?

Rép. : G = *50;* L = *102 cm; à 10 cm du foyer image de l'objectif;* L' = *122 cm.*

TABLEAU DES FORMULES D'OPTIQUE

- ***Lois générales*** réflexion : $i' = i$; réfraction : $\sin i = n \sin r$.

- ***Dioptre plan*** $\dfrac{n_1}{p_1} = \dfrac{n_2}{p_2}$ $\qquad \gamma = +1$.

- ***Lame à faces parallèles :*** $d = e\left(1 - \dfrac{1}{n}\right)$.

- ***Prisme***
$$\left\{\begin{array}{l} \sin i = n \sin r \\ r + r' = A \\ \sin i' = n \sin r' \\ D = i + i' - A, \text{ ou, si A et } i \text{ sont petits : } D = (n-1)A. \end{array}\right.$$

- ***Formules des lentilles :***
$$\left\{\begin{array}{l} \dfrac{1}{p} + \dfrac{1}{p'} = \dfrac{1}{f} \\ \gamma = -\dfrac{p'}{p} \end{array}\right.$$
p ou p' > 0 pour un élément réel ; < 0 pour un élément virtuel

f > 0 lentille convergente ; < 0 lentille divergente.

- ***Distances focales et convergences :***

lentilles
$$\left\{\begin{array}{l} C_{\text{dioptries}} = \dfrac{1}{f_{\text{mètres}}} \\ \dfrac{1}{f} = (n-1)\left(\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2}\right) \\ C = c_1 + c_2 + \ldots \text{ (lentilles accolées).} \end{array}\right.$$
R_1 et R_2 > 0 face convexe ; < 0 face concave

- ***Instruments d'optique :***

Puissance $P = \dfrac{\alpha'}{AB}$ $\qquad$ grossissement $G = \dfrac{\alpha'}{\alpha}$.

Loupe : $P = \dfrac{1}{f}$

Microscope : $P = p\gamma = \dfrac{\Delta}{f_1 f_2}$

$G = P \times \delta \qquad G_c = \dfrac{P}{4}$.

Lunette astronomique
$$\left\{\begin{array}{l} G = \dfrac{\alpha'}{\alpha} \\ G = \dfrac{F}{f} \quad \text{(lunette afocale).} \end{array}\right.$$

PROBLÈMES

QUELQUES CONSEILS

Que ce soit dans une classe ou dans une autre, un problème de physique n'est pas une devinette posée sur telle ou telle « formule à appliquer ». Il nous faut donc reprendre les mêmes méthodes que nous avons indiquées dans le livre de Seconde.

Faites avant toutes choses un schéma : schéma de l'expérience d'optique, de la simple lentille, du prisme ou de l'instrument plus complexe; schéma du montage utilisé en électricité. Ce schéma doit être clair et précis : indiquez à une échelle que vous choisirez la position des foyers des miroirs ou lentilles, des pôles positifs et négatifs des générateurs, le sens du courant, de l'induction magnétique.... Sur ce schéma vous raisonnerez comme si vous assistiez à l'expérience ou au phénomène étudiés dans le problème.

Le problème d'électricité consiste dans l'interprétation de l'expérience matérialisée par le montage que vous avez dessiné. N'oubliez pas les règles fondamentales sur le sens du courant, de l'induction magnétique, de la force électromagnétique. Les lois à appliquer sont peu nombreuses : loi de Joule, lois d'Ohm et de Pouillet, loi de Faraday, lois de l'électromagnétisme. Une attention toute particulière sera donnée aux unités : il faut vous familiariser avec elles au cours de l'introduction des différentes grandeurs; il ne faut surtout pas oublier de les préciser dans les résultats numériques.

En optique, construisez soit la marche d'un rayon, soit les images demandées. Tracez la marche d'un rayon, puis d'un faisceau lumineux en distinguant nettement les parties réelles et virtuelles. Habituez-vous peu à peu, en utilisant les discussions faites à propos des lentilles et des miroirs à prévoir sans calcul la position des images ou objets, à prévoir leur réalité ou leur virtualité. Le calcul ne vient qu'en dernier lieu : choisissez alors les formules les plus simples. Si votre résultat numérique ne s'accorde pas avec vos prévisions qualitatives, attention aux fautes de signes possibles ou aux erreurs numériques grossières!

ÉLECTRODYNAMIQUE

276. — On veut élever de 10° à 100° la température de 1 litre d'eau en 5 minutes en y plongeant un fil métallique parcouru par un courant.

1° Quelle devra être la résistance du fil, sachant que la différence de potentiel entre ses bornes, quand le courant passe, est de 125 volts?

2° Sachant qu'un fil de même substance et de 1 mm de diamètre a une résistance de 0,4 ohm par mètre, quelle longueur de fil de 0,4 mm de diamètre faudra-t-il prendre pour construire la résistance chauffante?

3° Quelle sera l'intensité du courant circulant dans le fil?

4° Quelle sera la dépense d'énergie électrique, sachant que le kilowatt-heure vaut 15 francs?

(Bacc. Alger.)

277 — Un générateur de f. e. m. 21 volts et de résistance intérieure 2,5 ohms, a ses pôles réunis par un circuit extérieur de résistance x ohms traversé par un courant de I ampères.

1° On veut que, dans la résistance extérieure, la puissance transformée par effet Joule soit 36 watts. Calculer x (on trouvera deux solutions) et les valeurs correspondantes de I.

Quelle est, dans chaque cas, la puissance totale fournie par le générateur? Quelle est celle des deux valeurs de x qu'il faut choisir pour que la puissance de 36 watts soit obtenue avec le minimum de dépense? Soit R cette valeur.

2° La résistance R, dont on vient de calculer la valeur, est constituée par deux conducteurs, de résistances R_1 et R_2, montés en dérivation. Calculer R_1 et R_2 pour qu'un courant de 0,4 ampère traverse la résistance R_1.

(1re CM et Techn. Indochine du Nord 1954.)

278. — Le filament d'une lampe à incandescence a une longueur totale de 50 cm et un diamètre de $\frac{5}{100}$ mm; il est formé d'un métal qui, à la température de 0°, a une résistance de 0,053 ohm pour un fil de 1 m de longueur et 1 mm² de section.

1° Calculer la résistance r du filament à 0°.

2° Dans les conditions de fonctionnement normal, avec 110 volts aux bornes, la lampe consomme 60 watts.

a) Calculer la résistance R_n à chaud du filament.

b) Quelle est l'intensité I_n du courant dans le filament?

c) En admettant que le filament est à la température de 2 000°, quelle est la variation moyenne de la résistance pour 1°?

3° On suppose que, quand la lampe fonctionne, la tension d'alimentation peut varier de 100 à 120 volts; on admet que, dans cet intervalle, la puissance consommée P (watts) est liée à la tension aux bornes U (volts) par la relation

$$\left(\frac{P}{60}\right)^2 = \left(\frac{U}{110}\right)^3.$$

a) En déduire la valeur de R en fonction de I.

b) Établir la valeur de R en fonction de U.

c) Démontrer que $RI_n = R_nI$.

d) Calculer R pour U = 100 volts et pour U = 120 volts.

e) En admettant que la variation de R en fonction de la température a la valeur trouvée dans la 2e question (*c*), quelle est à 1° près la température du filament pour les tensions U = 100 volts et U = 120 volts?

Données : $\frac{1}{\pi} = 0,31830$; $\sqrt{110} = 10,488$; $\sqrt{120} = 10,954$. *(Bacc. Grenoble.)*

279. — On groupe en série un certain nombre de générateurs de f. é. m. 2 volts et de résistance intérieure 0,1 ohm; on les fait débiter dans trois résistances inconnues R_1, R_2, R_3, disposées en dérivation. L'intensité qui traverse tous les générateurs est de 4 ampères.

Sachant qu'en 21 minutes il se dégage :

6 400 calories dans la résistance R_1;

9 600 calories dans la résistance R_2;

3 200 calories dans la résistance R_3, on demande :

a) la différence de potentiel V aux extrémités des résistances en dérivation;

b) les intensités des courants dans les trois branches;

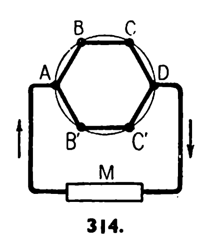
c) les valeurs des résistances R_1, R_2, R_3;

d) le nombre des générateurs utilisés.

On prendra J, équivalent mécanique de la calorie, égal à 4,2 joules.

(Bacc. La Martinique.)

280. — Sur un cercle en bois de 25 cm de rayon se trouvent à 60° les unes des autres des chevilles en ébonite permettant de maintenir tendu de l'une à l'autre un



314.

fil de cuivre dont la résistance par mètre est de 0,014 ohm (*fig. 314*). On relie les points A et D à une batterie d'accumulateurs composée de 5 éléments dont chacun a une f. é. m. de 1,8 volt.

La résistance du circuit AMD est de 8 994 750 microhms.

1° Calculer l'intensité du courant dans la branche AMD et dans les branches ABCD, AB'C'D.

2° Si l'on relie A et D par un fil tendu identique aux fils déjà employés, quelle résistance additionnelle faudra-t-il placer dans le parcours AMD pour que le courant ait dans AMD la même intensité que précédemment?

Calculer dans ces conditions l'intensité du courant dans AD et dans les branches ABCD et AB'C'D entre lesquelles se divise le courant qui arrive en A.

(Bacc. Grenoble.)

281. — On veut réaliser une installation électrique, alimentée en courant continu à 110 volts, comprenant :

a) un fer électrique de 350 watts;

b) un petit moteur susceptible de produire une puissance de 0,5 cheval-vapeur;

c) 10 lampes marquées 50 watts-110 volts.

1° Quelle est la longueur de la résistance du fer, sachant qu'elle est formée d'un fil de nichrome de $\frac{2}{10}$ mm de diamètre, de résistivité 40 microhms-cm?

2° Le moteur ayant un rendement de 70 %, quelle est sa résistance et sa f. c.-é. m.? On supposera que toute l'énergie perdue l'est par effet Joule.

3° Quel est le moment du couple en m-kgp que l'on devrait exercer sur l'axe du moteur pour l'empêcher de tourner, sachant que sa vitesse de rotation à vide est de 500 tours par minute?

Avec quelle vitesse pourrait-il soulever un poids de 30 kgp?

4° Si tous les appareils de l'installation fonctionnaient en même temps, quelle serait l'intensité totale du courant dans les fils aboutissant au compteur?

Quel serait le diamètre minimum des fils d'alimentation, la densité du courant maximum imposée étant de 4 ampères par $\overline{\text{mm}}^2$?

On négligera les résistances autres que celles des appareils.

(Bacc. Caen.)

282. — On veut construire une bouilloire électrique qui porte en 5 minutes un litre d'eau de 15° à la température d'ébullition. Pour cela, on immerge une résistance R dans l'eau d'un vase bien calorifugé et on la ferme sur une tension de 120 volts continus. Le vase d'un litre est en pyrex, de chaleur spécifique 0,2; sa masse est de 75 g.

1° En admettant que les pertes de chaleur soient négligeables, quelles doivent être la puissance électrique consommée, l'intensité du courant et la résistance utilisée?

2° On dispose, pour réaliser cette résistance, d'un alliage de résistivité 200 microhms-cm, de chaleur spécifique 0,1 et de densité 10. Trouver la longueur et le diamètre du fil utilisé, sachant que sa masse est $m = 10$ g.

Montrer qu'on pouvait bien négliger sa capacité calorifique dans le calcul de la puissance consommée si l'on se contente du millième.

3° Sachant que le kilowatt-heure coûte 16 F, combien dépense-t-on pour chauffer ce litre d'eau? Le mètre cube de gaz qui coûte 31 F fournit 5 000 kilo-calories. Admettant pour les fourneaux à air libre un rendement de $\frac{1}{3}$, calculer combien on chaufferait de litres d'eau pour le même prix avec le même vase en pyrex.

(Bacc. Besançon.)

283. — On réalise le montage ci-contre (*fig. 315*) :

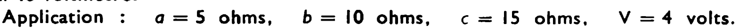
AC, BC et AD sont trois résistances fixes de valeurs a, b et c. BD est une résistance variable de valeur x. Entre C et D est disposé un voltmètre dont la résistance est assez grande pour qu'on puisse considérer comme nul le courant qui le traverse.

Entre A et B on établit une différence de potentiel fixe,

$$V_A - V_B = V.$$

Calculer en fonction de x, a, b, c et V la différence de potentiel $v = V_C - V_D$ qui sera mesurée par le voltmètre.

315.



Application : $a = 5$ ohms, $b = 10$ ohms, $c = 15$ ohms, $V = 4$ volts.

Quelle sera la valeur de x pour laquelle on aura $v = 0$?

Entre quelles limites variera v pour toutes les valeurs possibles de x?

Quelle sera la valeur de x si l'on trouve $v = 0{,}70$ volt?

Quelle sera la valeur de x si l'on trouve $v = -0{,}70$ volt? (*Bacc. Buenos Aires.*)

284. — Deux lampes électriques portent les indications suivantes :

Pour A_1 : 110 volts-40 watts;

Pour A_2 : 110 volts-100 watts.

1° Quelle sont, en régime normal, les résistances de ces deux lampes et les intensités qui les traversent?

2° Quel est le prix de revient de 10 heures d'éclairage avec chacune des lampes, sachant que le prix du kilowatt-heure est de 25 francs?

3° On dispose seulement d'une tension de 220 volts et, pour utiliser ces lampes, on songe d'abord à les mettre en série. Calculer quelle serait dans ce cas l'intensité traversant ces lampes, en supposant que leur résistance est invariable. Calculer les tensions aux bornes de chacune d'elles.

Les deux lampes auront-elles leur aspect normal? Quel est l'accident auquel on doit s'attendre si l'on fait effectivement l'expérience?

4° On dispose de plusieurs lampes de chacun des deux types. Indiquer le schéma suivant lequel on devrait monter n_1 lampes de type A_1 et n_2 lampes du type A_2, les lampes de chaque groupe étant en parallèle et les deux groupes étant en série, pour que, l'ensemble étant alimenté par une tension de 220 volts, les lampes fonctionnent cependant dans leurs conditions normales. Quelles sont les valeurs minima de n_1 et n_2?

285. — Une batterie d'accumulateurs B a une f. é. m. constante et une résistance intérieure de 4 ohms.

1° Les bornes M et N sont reliées par un fil de résistance négligeable à une résistance R_1 de 6 ohms; l'intensité est alors de 12 ampères. Donner la f. é. m. E de la batterie et la différence de potentiel V aux bornes. La résistance R_1 plonge dans un calorimètre dont la valeur en eau est 500 g et la température initiale 15°. Au bout de combien de temps la température sera-t-elle de 25°? (1 joule = 0,24 calorie.)

2° On ajoute entre M et N un fil F de résistance 12 ohms. Quelle est l'intensité totale du courant fourni et quelles sont les intensités i et i' dans la résistance R_1 et le fil F? Quelle est la différence de potentiel V′ aux bornes?

3° On dispose d'une deuxième batterie B′ dont le pôle + est relié au pôle + de la batterie B et l'autre pôle à un point P du fil F tel que le tronçon MP ait une résistance de 4 ohms. Aucun courant ne traverse B′. Quelle est la f. é. m. de cette batterie?

(*Bacc. Rome.*)

286. — Un circuit électrique comprend, disposés en série : un générateur de f. é. m. constante E égale à 52 volts et de résistance intérieure r égale à 1 ohm, un moteur et une résistance R de 5 ohms plongée dans un calorimètre. Les résistances des fils de jonction sont supposées négligeables.

a) On empêche le moteur de tourner : on constate alors dans R un dégagement de chaleur égal à 5 760 calories en 5 minutes.

b) Le moteur fonctionne : la quantité de chaleur dégagée dans R est réduite à 360 calories en 5 minutes.

Calculer :

1° l'intensité du courant à travers le circuit dans chacun des cas *a* et *b*;

2° la résistance intérieure *x* du moteur;

3° la f. c. é. m. du moteur;

4° la différence de potentiel V aux bornes du moteur.

1 joule équivaut à 0,24 calorie. *(Bacc. Poitiers.)*

287. — Un circuit fermé contient en série : *a*) un générateur dont la f. é. m. est 20 volts et la résistance intérieure 1 ohm; *b*) une bobine dont la résistance est 6 ohms; *c*) un moteur dont la résistance intérieure est 1 ohm; *d*) un ampèremètre de résistance négligeable.

1° On empêche d'abord le moteur de tourner. Déterminer l'indication de l'ampèremètre. Déterminer aussi l'indication d'un voltmètre placé en dérivation aux bornes du moteur.

2° On laisse le moteur tourner et l'on recueille du travail sur son arbre. Quand la vitesse de régime est atteinte, on constate que l'ampèremètre marque 1 ampère. Déterminer la f. c. é. m. du moteur, sa puissance et l'indication d'un voltmètre à ses bornes. Calculer en calories la quantité de chaleur dégagée en 10 minutes dans la bobine dans chacun des deux cas.

On prendra, pour l'équivalent mécanique de la calorie, 4,18 joules.

(Bacc. La Martinique.)

288. — On place en série entre les bornes d'un générateur de force électromotrice 31,6 volts un voltamètre à eau acidulée et une cuve électrolytique à sulfate de cuivre avec électrodes de cuivre. Dans le voltamètre on recueille l'ensemble des deux gaz qui se dégagent aux deux électrodes en 1 minute; on obtient ainsi 18 $\overline{cm}^3$ pour leur volume total. Sachant que la force contre-électromotrice du voltamètre est 1,6 volt on demande :

1° L'augmentation de poids en 1 heure de la cathode de la cuve à sulfate de cuivre

2° L'intensité du courant.

3° La résistance totale du circuit.

4° Les deux électrodes de cuivre sont remplacées par des électrodes de platine de mêmes dimensions. On ne recueille plus alors par minute que 17,6 $\overline{cm}^3$ de gaz dans le voltamètre. Expliquer pourquoi et calculer la force contre-électromotrice de la cuve à sulfate de cuivre.

Cu = 63 — 96 500 coulombs libèrent une valence-gramme. Le volume de 1 g d'hydrogène est 11,2 litres à 0°, 760 mm. *(Bacc. Paris.)*

289. — On veut charger une batterie d'accumulateurs de 10 volts, de résistance intérieure négligeable, à l'aide du courant continu du secteur à 110 volts. Pour cela, on met en série avec la batterie une lampe de résistance inconnue *x* et un ampèremètre de résistance négligeable.

1° Ignorant la polarité de la batterie, on fait les deux essais de branchement; on lit respectivement I = 1 ampère et I′ = 1,2 ampère. Quel est le cas qui correspond à la charge de la batterie? Quelle est la valeur de *x*?

2° Calculer la puissance dépensée dans la lampe pendant la charge; quel est le rendement énergétique de l'opération de charge, rapport de la puissance utilisée dans les accumulateurs pour la charge à la puissance totale dépensée.

3° La batterie ayant une capacité à la décharge de 10 ampères-heures et son rendement en quantité étant de 0,8, pendant combien de temps faudra-t-il faire durer la charge?

(Bacc. Caen.)

290. — Trente éléments de pile sont groupés en deux séries de 15 éléments, associées en parallèle. Chaque pile a pour force électromotrice 1,1 volt et pour résistance intérieure 1,2 ohm.

Le circuit extérieur comprend :

a) une résistance de 2 ohms;

b) un voltamètre à eau acidulée et à électrodes de platine, de résistance 2 ohms et de force contre-électromotrice inconnue;

c) un voltamètre à sulfate de cuivre et à électrodes de cuivre, de résistance 1,9 ohm.

La résistance et les deux voltamètres sont montés en série.

Sachant qu'il se dépose, en une heure, 1,185 g de cuivre, à la cathode du voltamètre, on demande :

1° l'intensité du courant qui parcourt le circuit extérieur;

2° le volume d'hydrogène dégagé pendant ce temps (mesuré dans les conditions normales);

3° les indications d'un voltmètre placé successivement aux bornes des différentes parties du circuit (voltamètres, résistances, bornes de la batterie de piles) et la valeur de la force contre-électromotrice du voltamètre à eau acidulée.

On négligera la résistance des connexions.

On donne Cu = 63,5 Ag = 107,88.

On rappelle que 1 coulomb libère 1,118 mg d'argent à la cathode d'un voltamètre à azotate d'argent. *(Bacc. Paris.)*

291. — Pour étudier un galvanomètre, on réalise le montage suivant *(fig. 316)* :

R, résistance fixe R = 10 000 ohms.

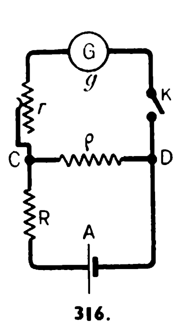
ρ, résistance fixe $\rho = 1$ ohm.

r, résistance variable de 0 à 10 000 ohms.

A, accumulateur, f. é. m. 2 volts, résistance intérieure négligeable.

G, galvanomètre étudié. On désignera par g la résistance inconnue de ce galvanomètre.

K est un interrupteur.



316.

1° L'interrupteur K étant « ouvert » (aucun courant ne passe dans G), calculer l'intensité I du courant qui traverse la résistance ρ et la différence de potentiel *v* entre les points C et D.

2° On ferme l'interrupteur K. Quelle est l'expression de l'intensité du courant qui traverse G en fonction de *r*? (On suppose, pour ce calcul, que la résistance g de G est assez grande devant ρ pour que la différence de potentiel entre C et D ne soit pas modifiée lorsqu'on ferme K.)

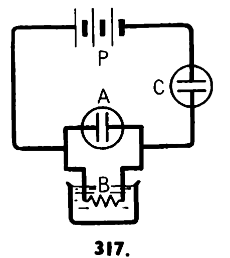
3° La déviation du galvanomètre est proportionnelle à l'intensité du courant qui le traverse. On observe les déviations suivantes :

$r = 0$ ohm, $\theta = 100$ divisions;
$r = 625$ ohms, $\theta = 50$ divisions.

Calculer, en utilisant le résultat de la deuxième question :

a) la résistance du galvanomètre;

b) l'intensité du courant qui, traversant G, provoque une déviation $\theta = 1$ division. *(Bacc. Espagne.)*



317.

292. — Dans le circuit représenté par la *figure 317*, P est un générateur de force électromotrice 17 volts de résistance intérieure négligeable; A est un voltamètre à solution de sulfate de cuivre SO_4Cu et anode de cuivre; B un fil de 5 ohms plongeant dans 250 g d'eau; C un voltamètre à eau acidulée par l'acide sulfurique de force contre-électromotrice 1,5 v. Les fils de connexion sont de résistances négligeables.

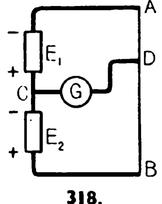
1° En 7 minutes la température de l'eau de B s'élève de 4°,5 et il se dépose 0,348 g de cuivre à la cathode du voltamètre A. Calculer les intensités dans les divers fils, les résistances des deux voltamètres, les volumes de gaz dégagés en 7 mn dans le voltamètre C, mesurés dans les conditions normales.

$$Cu = 64, \quad H = 1, \quad O = 16.$$

2° On intervertit les deux voltamètres. Calculer les intensités dans les divers fils

(Bacc. Liban.)

293. — Dans le montage représenté par la *figure 318* on trouve, placés en série, deux groupes d'accumulateurs de résistance intérieure négligeable dont les forces électromotrices seront désignées par E_1 et E_2. On trouve en outre une résistance ADB de valeur R = 3 ohms et une dérivation CD de résistance g = 0,87 ohm comprenant, un galvanomètre G. Toutes les résistances autres que ADB et CD sont considérées comme négligeables.



318.

1° Calculer E_2, sachant que pour E_1 = 6 volts et un point D tel que la résistance de AD soit R_1 = 1 ohm le galvanomètre n'est parcouru par aucun courant.

2° Trouver le sens et la grandeur du courant qui traverse le galvanomètre lorsque E_1 = 6 volts, E_2 = 12 volts et R_1 = 0,9 ohm.

(Bacc. Lille.)

294. — On dispose *(fig. 319)* :

a) d'un générateur de courant continu G, de résistance intérieure négligeable, de force électromotrice E = 20 volts;

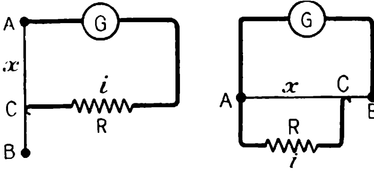
b) d'un fil AB rectiligne, de longueur l = 2 m, de section s = 0,16 mm², de résistivité $\rho = 80\ 10^{-6}$ ohm × cm;

c) d'une résistance fixe R = 4 ohms.

Sur le fil AB peut se déplacer un contact C réglable et les fils de connexion sont sans résistance.

1° Calculer la résistance du fil AB.

2° A quelle distance x de A faut-il placer le curseur C pour que le courant i qui passe dans R ait une intensité égale à 3 ampères et quelle est la puissance fournie par le générateur dans les deux cas :



319.

a) cas du montage de la figure 1;

b) cas du montage de la figure 2?

3° On déplace le curseur C d'un mouvement uniforme sur le fil AB de A jusqu'en B avec une vitesse de 2 cm par minute; le courant i varie alors en fonction du temps; donner l'expression de i en fonction du temps t :

a) dans le cas du montage 1;

b) dans le cas du montage 2.

(Bacc. Montpellier.)

295. — On possède un voltmètre à cadre mobile gradué de 0 à 5 V. On se propose d'étudier ce voltmètre et de l'adapter à différentes mesures.

1° Ce voltmètre, branché aux bornes d'un générateur de résistance intérieure négligeable, marque 3 V. Si l'on intercale en série avec le voltmètre et le même générateur une résistance R = 1 000 ohms, le voltmètre indique 1 V.

a) Quelle est la force électromotrice du générateur?

b) Quelle est la résistance g du voltmètre?

c) Quelle est l'intensité du courant qui traverse le voltmètre lorsque celui-ci indique 5 V?

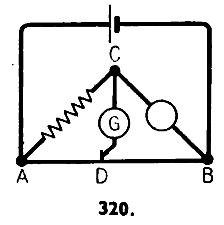
2° On désire mesurer avec ce voltmètre des différences de potentiel supérieures à 5 V. Quelle résistance faudra-t-il mettre en série avec le cadre de l'appareil pour

que la déviation maximum soit obtenue pour une différence de potentiel aux bornes de l'appareil modifié égale à 30 V, puis à 150 V?

3° On branche le voltmètre initial aux bornes d'une pile dont la résistance intérieure est de 50 ohms. Le voltmètre indique 1,5 V. Quelle est la valeur de la force électromotrice de la pile? *(Bacc. Toulouse.)*

296. — Ayant construit un ampèremètre, on mesure sa résistance et sa sensibilité.

1° On intercale l'ampèremètre dans la branche BC d'un pont à corde ABCD *(fig. 320)*. AB est un fil homogène, de section constante et de 60 cm de longueur. La résistance de la branche AC vaut 200 ohms. Le pont CD contient un galvanomètre G qui n'indique le passage d'aucun courant quand AD = 27,2 cm. Calculer la résistance de l'ampèremètre. Quelle est la résistance supplémentaire qu'il faut introduire dans le boîtier de l'ampèremètre, en série avec celui-ci, pour porter à 250 ohms la résistance de l'appareil (c'est-à-dire la résistance comprise entre ses bornes M et N)?



320.

2° Cette modification ayant été effectuée, on place en dérivation entre les bornes M et N une résistance *s* égale à 250/99 ohms. Calculer, dans ces conditions, la résistance comprise entre M et N.

3° L'ensemble précédent (ampèremètre shunté) est disposé en série avec un voltamètre à nitrate d'argent ($Ag\ NO_3$, Ag = 108) de manière à indiquer l'intensité du courant qui traverse le voltamètre. Le poids initial de la cathode est égal à 24,473 g. On fait passer un courant d'intensité invariable I telle que l'aiguille de l'ampèremètre est déplacée de 10 divisions à partir du zéro de la graduation. On coupe le courant au bout de 3 h et l'on constate que le poids de la cathode est devenu 36,560 g. Quelle est la valeur de I?

Quelle est l'intensité *i* du courant qui traversait l'ampèremètre lui-même? Déduire de ces résultats l'intensité correspondant à une division du cadran de l'ampèremètre shunté et non shunté.

4° On utilise le même appareil comme voltmètre après avoir ajouté, à l'intérieur du boîtier, une nouvelle résistance supplémentaire égale à 250 × 9 ohms. Calculer le nombre de volts correspondant à une division du cadran.

(Bacc. Lyon.)

297. — Un générateur de force électromotrice constante égale à 120 V a une résistance égale à 1 ohm. Il débite un courant à travers un circuit comprenant un moteur électrique et un voltamètre à sulfate de cuivre et électrodes de cuivre. La résistance du moteur est 1 ohm, celle du voltamètre est 20 ohms, et, entre les bornes de ce voltamètre, une résistance de 5 ohms est placée en dérivation. Les résistances des fils de jonction sont négligées.

1° Calculer la résistance totale du circuit.

2° On empêche le moteur de tourner. Calculer l'intensité du courant qui traverse le moteur et l'intensité du courant qui traverse le voltamètre.

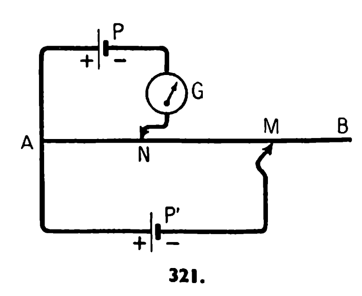
3° Calculer la masse de cuivre déposé à la cathode du voltamètre pendant 1 h.

4° On laisse le moteur tourner et fournir P joules par seconde. La masse de cuivre obtenu pendant une heure est 5 fois plus petite que précédemment. Calculer P.

Données : Cu = 63,5 g; 96 500 coulombs rompent une valence-gramme.

(Bacc. Clermont.)

298. — Un fil métallique AB, homogène, de diamètre constant et de 1 m de long, a une résistance de 10 ohms *(fig. 321)*. Deux contacts mobiles, M et N, peuvent être déplacés le long de AB. Le pôle positif d'une pile P, de force électromotrice constante égale à 1,00 volt, est relié à A, son pôle négatif à l'une des bornes d'un galvanomètre G, dont l'autre borne est reliée à N. Le pôle positif d'une autre pile P′ est relié à A, son pôle négatif à M. Les résistances des fils de jonction sont négligeables. On pose AM = *m* et AN = *n*.



321.

1° On prend $m = 100$ cm et déplace N jusqu'à ce que G ne dévie pas; il faut alors $n = 75$ cm. Calculer la force électromotrice e de P', en admettant que sa résistance intérieure r est négligeable.

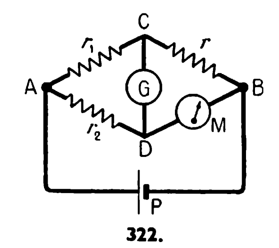
2° En réalité r n'est pas négligeable; pour en tenir compte on fait une deuxième mesure, en prenant $m = 50$ cm; pour que G reste au zéro il faut alors $n = 39,3$ cm. Déduire de ces mesures la valeur exacte, avec deux décimales, de e et celle de r.

3° On déplace le contact M de B vers A et, en même temps, le contact N, de façon que G ne dévie pas. Existe-t-il pour toute position de M une position de N satisfaisant à cette condition?

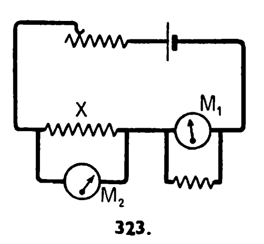
(Bacc. Montpellier.)

299. — L'étalonnage d'un microampèremètre a montré que la déviation de l'aiguille est proportionnelle à l'intensité du courant qui traverse l'appareil et que la déviation maximum, correspondant à 150 divisions de la graduation, est obtenue avec un courant de 75 μA.

1° On mesure la résistance de cet appareil à l'aide du dipositif (pont de Wheatstone) représenté schématiquement par la *figure 322*. Les résistances, r_1, r_2 et r sont constituées par des boîtes du modèle classique. Le microampèremètre M est intercalé entre B et D. G est un galvanomètre sensible destiné à vérifier qu'il ne passe aucun courant dans la branche CD lorsque le réglage est correct. P est une pile dont la force électromotrice est 1,1 V. Après avoir fixé à 15 000 ohms la valeur de chacune des résistances r_1 et r_2, l'expérimentateur fait varier la résistance r de telle sorte qu'il ne passe aucun courant dans le pont CD. Ce résultat est atteint pour $r = 1\,330$ ohms. On considère comme négligeables la résistance intérieure de la pile et celle des fils de liaison. Déduire de ces données la résistance du microampèremètre et l'intensité du courant qui le traverse lorsque le dispositif est réglé comme il vient d'être indiqué.



322.



323.

2° On place en dérivation entre les bornes du microampèremètre une résistance s. L'ensemble est traversé par un courant d'intensité totale I. Quelle valeur doit-on donner à s pour que la déviation maximum de l'aiguille soit atteinte pour $I = 600\,\mu$A puis pour $I = 1,5$ A. Calculer, dans les deux cas, la résistance équivalant à l'ensemble compris entre les deux bornes.

3° On utilise le microampèremètre comme voltmètre. Quelle différence de potentiel doit-on appliquer entre ses bornes pour obtenir la déviation maximum de l'aiguille? On introduit dans le boîtier de l'appareil, en série avec celui-ci, une résistance additionnelle. Quelle doit être la valeur de cette résistance pour que la déviation maximum soit obtenue avec une différence de potentiel; *a*) de 150 mV; *b*) de 1,5 V, appliquée entre les bornes de l'ensemble? Calculer, dans les deux cas, la résistance de l'ensemble constitué par l'appareil et la résistance additionnelle.

4° On dispose de deux microampèremètres M_1 et M_2 identiques au précédent *(fig. 323)*. Mais ces deux appareils ont été transformés, comme il vient d'être indiqué, l'un en ampèremètre pour mesurer des intensités s'étendant jusqu'à 1,5 A, et l'autre en voltmètre utilisable jusqu'à 1,5 V. Ces deux appareils sont montés comme l'in-

dique la *figure 323*. X est une résistance inconnue parcourue par le courant fourni par un accumulateur. On constate que l'aiguille de M_1 se fixe sur la division 43, tandis que celle de M_2 se fixe sur la division 86, calculer X. Cette valeur est-elle correcte?

(Bacc. Lyon.)

300. — Le courant électrique est distribué dans un appartement à partir d'un compteur de 10 ampères, ce qui signifie que le compteur peut être traversé par un courant de 10 ampères au maximum. La tension de distribution est V = 110 volts. L'installation électrique comprend :

un aspirateur consommant une puissance

$$P_1 = 330 \text{ watts};$$

un fer à repasser consommant une puissance

$$P_2 = 330 \text{ watts};$$

un radiateur consommant une puissance

$$P_3 = 550 \text{ watts}.$$

Ces trois appareils sont construits pour fonctionner sous une tension de 110 volts.

1° Ces différents appareils doivent-ils être branchés en série ou en parallèle? Pourquoi?

2° Calculer la résistance, R_2, du fer et la résistance, R_3, du radiateur.

3° Calculer la longueur l_2, du fil chauffant du fer à repasser. Ce fil est en ferro-nickel, de résistivité $\rho = 100$ μΩcm à la température de fonctionnement. Le diamètre du fil est $d = 0{,}2$ millimètre.

4° Sachant que le kilowatt-heure coûte 23 francs, quel est le prix de revient d'une heure de repassage?

5° Quel est le prix de revient de 2 heures de fonctionnement du radiateur?

6° Peut-on brancher simultanément le radiateur, le fer à repasser et l'aspirateur? Pourquoi?

(1re M. Athènes 1954.)

301. — 1° On réalise un circuit comprenant un générateur de force électromotrice E = 12 volts, un ampèremètre de résistance négligeable, un rhéostat et un fil ACB; dont on veut mesurer la résistance. L'ampèremètre marque 0,8 ampère et un voltmètre de très grande résistance placé entre A et B marque 4 volts.

a) Quelle est la résistance du fil ACB et quelle est sa longueur, sachant que ce fil a pour diamètre 0,50 millimètre et qu'il est fait d'un alliage de résistivité 110 μΩcm?

b) Sachant que, durant l'expérience, la résistance du rhéostat était 9 ohms, quelle est la résistance intérieure *r* du générateur et quelle indication donnerait le voltmètre placé à ses bornes?

2° Utilisant le même circuit, on place en dérivation aux extrémités A et B du fil ACB un autre fil ADB de même nature, de même longueur, mais de diamètre 0,25 millimètre. La résistance du rhéostat est alors 15 ohms. Quelle est l'intensité dans chacun des fils?

3° On enlève les fils ACB et ADB et on leur substitue un voltamètre à solution sulfurique et électrodes de plomb, de résistance 0,1 ohm; la résistance du rhéostat est 18,9 ohms. L'ampèremètre marque 0,5 ampère.

a) Quels sont les phénomènes chimiques produits dans le voltamètre? Quelle est sa force contre-électromotrice et quelle est l'indication donnée par un voltmètre placé à ses bornes?

b) On coupe le circuit et l'on constate que le voltmètre laissé en place aux bornes du voltamètre marque encore une déviation pendant quelque temps. Expliquer le phénomène et indiquer le sens du courant.

(1re C. M., 1955.)

302. — 1° Le circuit extérieur d'un générateur, de f. é. m. E = 31,5 volts, de résistance intérieure $r = 1$ ohm, contient :

a) une résistance R constituée par un fil métallique de résistivité $\rho = 31{,}4$ μΩcm, de longueur 2,50 m et de diamètre $d = 1$ mm;

b) un voltamètre à $CuSO_4$, à électrodes en cuivre, dont la résistance est de 8 ohms.

On demande :

α) l'intensité du courant, à 0,01 ampère près;

β) le poids de cuivre déposé par minute (Cu = 63,5).

2° On place en dérivation aux bornes du voltamètre un moteur dont la résistance est 4 ohms. Le moteur étant immobilisé, calculer :

a) l'intensité du courant dans la résistance R;

b) le poids de cuivre déposé par minute;

c) la quantité de chaleur apparue par minute dans le moteur. On donne J = 4,18 joules par calorie.

3° On supprime le voltamètre à $CuSO_4$ tout en laissant la résistance R et on laisse tourner le moteur dont la force contre-électromotrice est e = 4,8 volts.

Calculer l'intensité du courant qui circule dans le circuit.

N. B. — On rappelle que 96 500 coulombs libèrent une valence-gramme.

(1re C. M. et Techn., Alger 1954.)

303. — On dispose d'un galvanomètre sensible, G, de résistance 250 ohms et déviant à fond quand il est traversé par un courant de 1 milliampère. Le cadran porte 100 divisions.

On l'utilise, sans le modifier, pour évaluer une différence de potentiel $V_A - V_B$ créée par un courant de 10 ampères, passant dans une résistance variable R.

1° Comment réaliser le montage? Faire la figure.

2° Quelle est la différence de potentiel maximum qu'il peut mesurer et quelle est la différence de potentiel qui correspond à 10 divisions du cadran?

3° Quelle est la valeur de R nécessaire pour que l'appareil, monté en voltmètre, ait son aiguille devant la division 50 du cadran?

4° Comment modifier l'appareil pour que la division 100 corresponde à une différence de potentiel de 25 volts?

5° Donner en conclusion le schéma d'un voltmètre possédant les sensibilités 25 volts, 100 volts, 1 000 volts et réalisé avec le galvanomètre G. Calculer les éléments nécessaires au montage et indiquer la puissance maximum que chaque élément aura à dissiper.

(1re C' et M', Alger 1954.)

304. — On dispose de quarante éléments de pile Daniell ayant chacun une f. é. m. de 1,1 volt et une résistance intérieure de 0,8 ohm. On les groupe en quatre séries de dix éléments et ces quatre séries sont montées en parallèle.

1° Calculer la f. é. m. et la résistance intérieure du générateur ainsi constitué.

2° Les pôles de ce générateur sont réunis par des fils de résistance négligeable aux bornes d'un circuit extérieur composé d'une bobine, B, en série avec un ampèremètre shunté au $\frac{1}{10}$ (le dixième du courant principal passe dans l'appareil).

a) Sachant que, dans ces conditions, l'ampèremètre, dont la résistance est 0,1 ohm, marque 0,2 ampère, calculer la résistance du shunt et celle de la bobine B.

b) Le shunt étant constitué par un fil de cuivre de 35 cm de longueur et de 0,8 mm de diamètre, calculer la résistivité du cuivre.

3° La bobine B et l'ampèremètre shunté sont enlevés et remplacés par un voltamètre à eau acidulée et à électrodes de platine, de résistance 0,5 ohm. Le courant ayant passé pendant trois minutes, on recueille dans une éprouvette, coiffant à la fois les deux électrodes, un volume gazeux qui, mesuré dans les conditions normales, est 119 cm^3.

Calculer :

a) l'intensité du courant débité;

b) la force contre-électromotrice du voltamètre.

On rappelle que 1 g d'hydrogène occupe, dans les conditions normales, un volume de 11,2 *l*.

(1re C. M. et Techn. Indochine du Sud 1954.)

305. — 1° On relie les extrémités d'un fil cylindrique homogène, de section uniforme, AB, aux bornes d'un accumulateur de f. é. m. égale à 2 volts, de résistance intérieure négligeable. Le fil est alors traversé par un courant de 0,50 ampère. Sachant que le fil a une longueur de 100 cm et un diamètre de 0,40 mm, calculer la résistivité de l'alliage dont il est formé.

2° On branche en dérivation entre le point A et un autre point C du fil, un circuit qui comprend une pile P et un galvanomètre; les pôles positifs de la pile et de l'accumulateur sont tous deux reliés au point A. On constate que si AC = 55 cm, aucun courant ne traverse le galvanomètre. Faire le schéma du montage et calculer la f. é. m. de la pile P.

3° On déplace le contact C le long du fil. On pose AC = x. Calculer en fonction de x l'intensité du courant qui traverse le galvanomètre.

Dans les deux cas particuliers $x = 25$ centimètres et $x = 75$ centimètres, calculer l'intensité de ce courant et indiquer son sens sur un schéma.

La résistance intérieure de la pile est 2 ohms et celle du galvanomètre 98 ohms.

(1re C. M. Réunion 1954.)

306. — Soixante accumulateurs ayant chacun une f. é. m. de 2 volts et une résistance intérieure de 0,01 ohm sont groupés en série. Les bornes extrêmes A et B sont reliées à deux bornes fixes C et D. L'ensemble des conducteurs AC et BD a une résistance R = 6,9 ohms.

1° Les bornes C et D sont reliées par une résistance de valeur R′ = 2,5 ohms. Quelle est l'intensité I du courant débité? Quelle est la différence de potentiel U aux bornes A et B de la batterie?

2° On remplace la résistance R′ par un moteur. Ce moteur a une résistance de valeur R″ = 0,5 ohm et fonctionne de manière que l'intensité garde la même valeur que précédemment.

Quelle est la différence de potentiel U′ entre C et D? Quelle est la puissance P *reçue* par le moteur? Quelle est sa force contre-électromotrice?

3° Quelle doit être l'intensité I′ débitée par cette batterie d'accumulateurs pour que la puissance disponible entre C et D soit maximum, *quels que soient les appareils* branchés entre ces deux bornes?

(Bacc. C. M. et Technique juin 1956).

307. — La graduation du cadran d'un milliampèremètre à cadre mobile comporte 50 divisions; le constructeur indique les caractéristiques suivantes : l'aiguille dévie de 50 divisions pour une intensité de 1 milliampère et la résistance de l'appareil est 250 ohms.

A

1. Quelle résistance faut-il mettre en parallèle avec le milliampèremètre pour qu'une déviation de 50 divisions corresponde à un courant de 100 milliampères?

2. Pour vérifier cette transformation de l'appareil on le place en série avec une cuve à électrolyse à nitrate d'argent et électrodes d'argent dans un circuit alimenté par un générateur de f. é. m. constante. Avec un rhéostat, on règle l'intensité de façon que l'aiguille du milliampèremètre soit sur la division 50. Faire le schéma du montage. On constate alors qu'en trente minutes, la masse de la cathode augmente de 0,210 gramme. Quel est, en milliampères, l'écart entre l'intensité indiquée par le milliampèremètre et l'intensité réelle? Quelle est l'erreur relative commise?

B

1. On veut maintenant transformer le milliampèremètre en voltmètre donnant une déviation de 50 divisions pour une différence de potentiel de 5 volts. Quelle résistance faut-il adjoindre à l'appareil? Faire un schéma de montage.

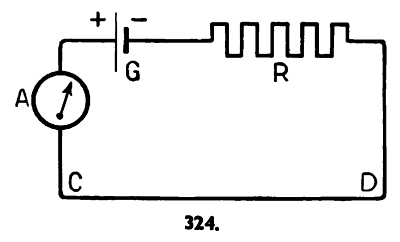
2. Quelle longueur de fil de manganine de 0,05 mm de diamètre faut-il utiliser pour réaliser cette résistance? La résistivité de la manganine est de 45 microhms × cm.

3. A titre de vérification, on branche le voltmètre aux bornes d'une pile de f. é. m. 1,08 volt et de résistance intérieure 1 ohm. Sur quelle division de la graduation se placera l'aiguille de l'appareil?

Nota. — Il est demandé de justifier par un raisonnement simple et clair le choix de la résistance qu'il convient d'adjoindre au milliampèremètre dans chacun des cas.

(Bacc. C' et M' juin 1956.)

308. — **1.** Un fil cylindrique CD, constitué d'un alliage métallique utilisé pour la construction des rhéostats, a une longueur de 1 m, une section de 0,2 mm^2 et une résistance de 5 ohms. Quelle est la résistivité de l'alliage utilisé?



324.

2. On réalise le montage représenté par la *figure 324* :

G, générateur de f. é. m. 4 volts, de résistance intérieure 0,1 ohm;

A, ampèremètre de résistance 0,1 ohm;

CD, fil dont on a parlé dans la question 1°;

R, résistance auxiliaire.

Les fils de jonction ont une résistance négligeable.

Quelles doivent être la valeur de la résistance R et de l'intensité indiquée par l'ampèremètre pour que la différence de potentiel entre C et D soit de 2 volts?

3. Ces conditions sont réalisées. Le point C est du côté de la borne positive de G. Par des fils conducteurs, on réunit la borne positive d'une pile P au point C et la borne négative au point M de CD situé à 72 cm de C. On constate (par exemple à l'aide d'un galvanomètre) qu'aucun courant ne traverse la pile. Montrer que le courant débité par G est le même que dans la question précédente. Quelle est la f. é. m. de la pile P. Faire un schéma.

4. Si la f. é. m. de G vient à diminuer de 5 %, de combien de volts devrait diminuer la f. é. m. de la pile P pour qu'elle continue à n'être parcourue par aucun courant?

(Bacc. C. et M. Septembre 1956.)

309. — On électrolyse une solution de sulfate de sodium dans un tube en forme d'U, à l'aide d'électrodes circulaires de même diamètre que le tube $d = 20$ mm; la longueur totale entre les électrodes est $l = 30$ cm.

En élevant progressivement la différence de potentiel entre ces électrodes à partir de zéro, on constate que l'électrolyse commence lorsque cette différence de potentiel atteint 1,7 volt. On continue à élever cette tension jusqu'à la valeur 12 volts, et il passe alors un courant de 537 milliampères.

1. Décrire les phénomènes observés au voisinage des électrodes supposées inattaquables.

2. Quelles sont la résistance de la colonne liquide et la résistivité de l'électrolyte? On précisera les unités employées.

3. Pendant combien de temps faut-il faire passer le courant pour recueillir à la cathode 100 cm^3 de gaz mesurés dans les conditions normales de température et de pression? (On rappelle qu'un Faraday = 96 500 coulombs et qu'un gramme d'hydrogène gazeux occupe 11 200 cm^3 dans les conditions normales).

4. Quelle serait en francs la dépense correspondant à la production d'un litre de gaz à la cathode, sachant que le prix du kilowatt-heure est de 35,5 francs.

(Bacc. C. et M. juin 1957.)

310. — Un circuit alimenté sous tension constante de 110 volts comprend disposés en série :

a) une résistance R;

b) un moteur M, de résistance r;

c) un voltamètre à sulfate de cuivre et électrodes de cuivre dont la résistance intérieure est de 2 ohms.

1. La résistance R est constituée par un fil de ferro-nickel de résistivité 80 microhms-centimètre et dont la section est 1 millimètre carré et la longueur 20 mètres.

Déterminer la valeur de cette résistance R.

2. Le moteur M étant calé, la masse de la cathode du voltamètre augmente de 0,593 gramme en 6 minutes :

a) Décrire brièvement, en les interprétant, les phénomènes observés;

b) Calculer l'intensité du courant;

c) Calculer la résistance *r* du moteur.

Cu = 63,6   1 Faraday = 96 500 coulombs.

3. Le moteur tourne; l'intensité diminue et se fixe à 2 ampères :

a) Expliquer pourquoi;

b) Calculer la force contre-électromotrice du moteur;

c) Calculer la tension aux bornes du moteur;

d) Calculer le rendement du moteur. (*Bacc. I*re *Technique juin 1957.*)

311. — 1° On place deux générateurs en série ($E_1 = E_2 = 110$ V); ils débitent un courant $I = 2$ A dans deux lampes en série ($R_1 = R_2 = 54\ \Omega$); calculer la résistance intérieure de chaque générateur ($\rho_1 = \rho_2$). Calculer la tension aux bornes : *a*) de chaque lampe; *b*) des deux lampes; *c*) de chaque générateur; *d*) des deux générateurs.

2° On place ces deux générateurs en parallèle; ils débitent un courant qui se partage entre les deux lampes précédentes montées en parallèle.

Calculer les divers courants qui circulent.

Calculer la tension aux bornes de chaque lampe et de chaque générateur.

Calculer la résistance totale du circuit.

(*I*re *C. M. Techn. Éthiopie 1954.*)

312. — On désire faire une étude expérimentale du dégagement de chaleur produit par le passage d'un courant électrique dans un conducteur pour essayer d'établir la loi qui régit ce phénomène.

a) Dresser une liste du matériel nécessaire pour réaliser cette étude expérimentale.

b) Faire un schéma du dispositif employé, accompagné d'un commentaire.

c) Indiquer les faits observés au cours de l'expérience et énoncer les conclusions que l'on peut tirer de cette étude.

II. — On utilise un même générateur de force électromotrice $E = 20$ volts et de résistance intérieure $r = 4$ ohms pour réaliser les trois montages suivants :

1° le générateur entre les bornes duquel est branché une résistance, R;

2° le générateur entre les bornes duquel sont montées en série quatre résistances identiques à la précédente;

3° le générateur entre les bornes duquel sont montées en dérivation quatre résistances identiques à la première.

On constate que la quantité de chaleur dégagée en 7 minutes dans la résistance R du premier montage élève la température de 1 litre d'eau de 2,5 °C. On demande :

a) la valeur de la résistance R;

b) quelle serait l'élévation de température de 200 grammes d'eau recevant la quantité de chaleur dégagée en 7 minutes dans l'ensemble des résistances extérieures du deuxième montage;

c) quelle serait l'élévation de température de 200 grammes d'eau recevant la quantité de chaleur dégagée en 7 minutes dans l'ensemble des résistances extérieures du troisième montage.

N. B. Pour le calcul numérique de la 2e partie, on pourra avantageusement prendre 1 calorie = 4,2 joules.

(*Alger C' M' 1954.*

313. — On dispose de deux piles hydroélectriques identiques dont on ne connaît que l'ordre de grandeur des caractéristiques (f. é. m. E de quelques volts, résistance intérieure r comprise entre 7,5 et 10 ohms). On se propose de les déterminer :

1° Comment mesurer rapidement et simplement E? Donner le schéma correspondant. Pourquoi la mesure n'est-elle qu'approchée? On trouve ainsi E = 1,45 volt.

2° On constitue ensuite un circuit comportant l'une des piles, une résistance variable R, un ampèremètre, un interrupteur. Un voltmètre est placé aux bornes de la pile. Faire le schéma du montage. On dispose d'une série d'ampèremètres dont les échelles complètes vont respectivement :

de 0 à 50 mA;
de 0 à 200 mA;
de 0 à 1 A;
de 0 à 5 A.

Lequel utiliser? Justifier votre réponse.

En faisant varier R, on obtient les valeurs respectives suivantes de l'intensité et de la différence de potentiel V :

I (mA)	20	51	89	135	180
V (volts)	1,33	1,08	0,81	0,48	0,12

Reporter avec soin les points correspondants dans le système d'axes :
I en abscisse (échelle 1 cm pour 0,01 A);
V en ordonnée (échelle 1 cm pour 0,1 V).

Tracer la courbe V en fonction de I. Quelle est la nature de cette courbe? Peut-on la justifier théoriquement?

En déduire, par des mesures sur le graphique, les valeurs de E et de r. Comparer la valeur de E ainsi obtenue à celle que la première expérience ne donne que d'une façon approchée.

3° *a*) On reproduit le circuit précédent en prenant comme générateur les deux piles en série. Quelle modification subit la courbe V (tension aux bornes du générateur fonction de I?

b) Même question, le générateur étant formé des deux piles en parallèle.

(*1re C' M', A. E. F., Cameroun, Maroc et Togo 1954.*)

314. — Entre les bornes d'un secteur continu de 220 volts, sont placés en série un moteur et une résistance (rhéostat) variable entre 0 et 18 ohms.

1° Quand le moteur est calé et le rhéostat utilisé avec la résistance maximum, la différence de potentiel aux bornes du moteur est 40 volts. On demande :

a) la résistance du moteur;

b) la quantité de chaleur dégagée en 5 minutes dans le moteur.

2° Quand le moteur fonctionne et que la résistance du rhéostat a été progressivement annulée, la puissance mécanique fournie par le moteur est 424 watts.

Calculer :

a) l'intensité du courant dans ce circuit; parmi les deux valeurs possibles on choisira celle qui correspondra au meilleur rendement du moteur (celle qui exigera moins de puissance du secteur);

b) la force contre-électromotrice du moteur et la différence de potentiel aux bornes du moteur;

c) la quantité de chaleur dégagée en 5 minutes dans le moteur.

(*1re C. M. Rome 1954.*)

315. — 1° Enoncer les lois quantitatives de l'électrolyse. Montrer comment, avec le matériel suivant : balance, boîte de poids, accumulateurs, rhéostat, ampèremètres, cuve à électrolyse contenant une solution de sulfate de cuivre, chronomètre, interrupteurs, fil conducteur, on peut effectuer une vérification expérimentale de ces lois. Faire le schéma du montage et décrire très succinctement les expériences.

2° Le générateur est formé de 5 éléments d'accumulateurs montés en série, de force électromotrice 2 volts et de résistance intérieure négligeable.

a) le rhéostat ayant une résistance de 3 ohms et la cuve de sulfate de cuivre une résistance de 1 ohm, quelle sera la masse de cuivre déposée à la cathode au bout de 20 minutes? On prendra pour le poids atomique du cuivre Cu = 64.

b) On remplace la cuve à sulfate de cuivre par une cuve à eau acidulée; le rhéostat ayant toujours une résistance de 3 ohms, le courant tombe à 1,5 ampère. Quels sont les volumes gazeux recueillis à l'anode et à la cathode au bout de 20 minutes dans les conditions normales?

c) Quelle sera l'indication d'un voltmètre branché aux bornes de la cuve dans cette dernière expérience et la quantité de chaleur dégagée dans l'eau acidulée? La force contre-électromotrice de la cuve est 1,5 volt. *(1re M' Espagne 1955.)*

316. — Un circuit comprend, en série : une batterie d'accumulateurs de f. é. m. 10 volts et de résistance négligeable; une résistance constante de 5 Ω plongée dans un calorimètre; un voltamètre à sulfate de cuivre et électrodes de platine; un rhéostat de résistance 2 Ω.

1° Le calorimètre ayant un équivalent en eau égal à 200 g, on observe une élévation de température de 1,43 °C par minute. Calculer l'intensité du courant qui traverse le circuit. En déduire la différence de potentiel aux bornes du voltamètre.

2° On remplace les électrodes de platine du voltamètre par des électrodes de cuivre de même forme; on admettra que la résistance du voltamètre n'est pas modifiée. L'élévation de température du calorimètre devient 1,73 °C par minute. Calculer la résistance intérieure du voltamètre et la force contre-électromotrice du voltamètre à électrodes de platine utilisé précédemment.

3° On met en dérivation aux bornes du voltamètre à électrodes de cuivre une résistance de 2,1 Ω; calculer la nouvelle intensité qui parcourt le circuit.

ÉLECTROMAGNÉTISME

317. — Un barreau aimanté vertical NS est suspendu par son pôle nord à un ressort qui s'allonge de 1,2 cm sous l'action d'un poids de 6 grammes. Sur la verticale du pôle S on approche un autre pôle N′ d'un barreau identique au premier, à 1 cm du pôle S lorsque le pôle est seul.

Établir la relation qui existe entre la masse magnétique m de chacun des pôles et la distance x entre les deux pôles S et N′ à l'équilibre.

Calculer m pour un allongement du ressort de 1 mm et de 2,5 mm.

N. B. — Les aimants sont supposés très longs : on néglige ainsi les actions des pôles autres que N′ et S.

318. — Une petite aiguille aimantée horizontale NS pouvant tourner autour d'un axe vertical passant par son centre est disposée à une certaine distance d'un long fil vertical conducteur. Lorsqu'il ne passe aucun courant dans le fil, la demi-droite NS rencontre le fil. (La distance de l'aimant au fil est grande par rapport aux dimensions de l'aiguille.)

1° Dans quel sens est déviée l'aiguille quand un courant ascendant parcourt le fil?

2° Sachant que la composante horizontale de l'induction magnétique terrestre vaut 0,2 gauss et que l'aiguille a tourné de 1°, calculer l'intensité de l'induction magnétique produite par le courant au voisinage de l'aiguille.

3° Le courant était de 0,3 ampère. Quel courant faut-il maintenant faire passer dans le fil pour que la déviation soit de 45°? Quelle est alors l'intensité de l'induction magnétique résultante au voisinage de l'aiguille?

4° Conservant cette dernière intensité de courant et laissant le fil vertical on fait tourner celui-ci de 30° autour du centre de l'aiguille à partir de sa position primitive dans un sens, puis dans l'autre. De quel angle tourne l'aiguille dans chaque cas? *(Bacc. Paris.)*

319. — Un circuit électrique comprend :

a) un générateur de force électromotrice 12 volts et de résistance intérieure 2 ohms;

b) une bobine de 30 cm de longueur, formée par l'enroulement d'un fil fin de 1 mm de diamètre. Les spires sont jointives, leur rayon moyen est 5 cm et on négligera l'épaisseur de l'isolant. La résistivité du métal constituant le fil est $\rho = 2{,}5 .\ 10^{-6}$ ohms × cm;

c) un disque de cuivre de 5 cm de rayon (*roue de Barlow*) tournant autour d'un axe horizontal. La partie inférieure frotte dans une gouttière de mercure. Le courant arrive par le mercure et sort par l'axe. Ce disque est placé dans un champ d'induction uniforme de 1 tesla, perpendiculaire au plan du disque, produit par un électro-aimant. La résistance offerte par le disque au courant est négligeable.

d) un rhéostat marquant une résistance

$$R = 30 \text{ ohms.}$$

1° Le générateur, la bobine, le disque et le rhéostat sont placés en série. Calculer l'intensité *i* du courant, en négligeant la force contre-électromotrice que peut présenter le disque en rotation.

2° Calculer la valeur de l'induction magnétique uniforme créée à l'intérieur de la bobine.

3° On place en dérivation aux bornes de la bobine une résistance telle que la bobine est parcourue par un courant égal au $\frac{1}{10}$ du courant précédent. L'intensité du courant dans le reste du circuit est maintenue égale à *i* par une modification convenable de la résistance du rhéostat. Calculer la nouvelle valeur R′ de cette résistance du rhéostat.

4° Le disque en tournant constitue un petit moteur qui effectue 5 tours par seconde. Calculer :

a) la force exercée sur l'élément de courant;

b) la puissance en watts (on admettra que le travail de la force pour un tour de la roue est le même que si son point d'application décrivait une circonférence de rayon égal à la moitié de celui du disque)

(Bacc. Paris.)

320. — Un accumulateur de force électromotrice 2 volts, de résistance intérieure négligeable, est relié à une longue bobine dont la résistance est 50 ohms.

1° Quelle résistance faut-il mettre en série avec cette longue bobine pour que l'intensité du courant qui passe dans cette bobine soit de 1 mA? Les fils de jonction ont une résistance négligeable.

2° La résistance en série, précédemment calculée, étant maintenue dans le circuit, on place en dérivation entre les bornes de la longue bobine, une résistance de 12,5 ohms. Quelle est la nouvelle valeur de l'intensité du courant dans la bobine?

3° On enlève maintenant la résistance placée entre les bornes de la bobine et l'on constitue le circuit comme dans la première question de manière à pouvoir lancer dans la bobine un courant de 1 mA. On coupe le courant; on installe un petit aimant mobile autour d'un axe vertical à l'intérieur de la bobine. La bobine est horizontale et son axe est perpendiculaire au méridien magnétique. Cette bobine a 10 spires par cm de longueur compté sur l'axe.

Lorsqu'on ferme le circuit et que le courant est établi, l'aiguille dévie de 3°34′30″.

Montrer que l'on peut déduire de cette expérience la valeur de la composante horizontale de l'induction magnétique terrestre, que l'on calculera.

N. B. — On pourra confondre les angles exprimés en radians avec leurs tangentes.

(Bacc. Dijon.)

321. — Un solénoïde comprend 400 spires enroulées sur un cylindre de diamètre 10 cm et de longueur 1 m. Ces spires sont faites d'un fil de cuivre de résistivité 1,584 microhm-cm, de diamètre 0,26 mm. Son axe est placé horizontalement et perpendiculairement au méridien magnétique terrestre. Une petite aiguille aimantée

mobile sur un pivot sans frottement est placée à l'intérieur du solénoïde, en son centre. Le circuit électrique figuré ci-contre comprend un accumulateur A de f. é. m. 2 volts et de résistance intérieure négligeable, un rhéostat Rh, une pile P placée sur une dérivation contenant aussi un galvanomètre G (*fig. 325*).

1° Le circuit étant établi, on règle le rhéostat pour que l'aiguille aimantée tourne exactement de 45° depuis sa position initiale.

Quelle est l'intensité du courant qui traverse le solénoïde? (On prendra $4\pi = 12{,}5$).

2° Calculer la résistance du solénoïde et la différence de potentiel entre ses bornes.

3° Le galvanomètre G n'indique alors le passage d'aucun courant. Quelle est la force électromotrice de la pile P?

4° Quelle est la résistance utile du rhéostat et la quantité de chaleur qui s'y dégage par minute?

325.

5° On coupe le circuit en B; le galvanomètre indique alors le passage d'un courant de 10 milliampères. Quelle est la résistance de la pile P, celle du galvanomètre G étant égale à 110 ohms?

Composante horizontale de l'induction terrestre : 0,2 gauss.

(Bacc. Lyon.)

322. — Un ampèremètre A est gradué en millièmes d'ampère de 0 à 100 milliampères. Sa résistance est 1 ohm.

1° Quelle résistance *s* (shunt) faut-il placer en dérivation entre ses bornes pour que l'appareil muni de son shunt, étant placé dans un circuit, marque 100 quand le circuit est parcouru par un courant de 1 ampère?

Quelle est alors l'intensité i_1 du courant qui traverse A et l'intensité i_2 du courant qui traverse le shunt? Quelle est la résistance R équivalente à l'appareil shunté?

2° L'appareil shunté précédent est placé en série dans un circuit qui contient une bobine B dont la résistance est de 5 ohms, et un générateur (f. é. m. E, résistance intérieure *r*). Les fils de jonction ont une résistance négligeable. L'aiguille de l'ampèremètre se fixe à la division 50.

On remplace la bobine B par une autre B′ dont la résistance est égale à 10 ohms. L'aiguille de l'ampèremètre se fixe alors à la division 40.

Calculer E et *r*.

3° La bobine B′ est longue; elle porte 1 000 spires et a 1 m de longueur. Quelle est en gauss l'induction magnétique B créée à l'intérieur de cette bobine dans l'expérience précédente?

(Bacc. Lille.)

323. — A. Trois accumulateurs de force électromotrice égale à 2 volts, de résistance négligeable, sont disposés en série avec un fil de maillechort de 2 m de longueur, de 0,5 mm² de section droite, de résistivité $\rho = 30 \times 10^{-6}$ ohm cm.

a) Quelle est l'intensité débitée dans ce circuit?

b) Le fil de maillechort est enroulé en spirale et plongé dans un calorimètre contenant 290 g d'eau. Le calorimètre et son agitateur, tous deux en laiton, pèsent ensemble 100 g. Quelle est l'élévation de la température du calorimètre lorsque le courant y passe pendant 7 minutes?

Chaleur spécifique du laiton = 0,09.

Equivalent mécanique de la calorie = 4,18 joules.

La capacité calorifique du fil de maillechort est négligeable.

B. On substitue au fil de maillechort un voltamètre à eau acidulée, à électrodes de platine, de 2 ohms de résistance, de force contre-électromotrice égale à 1,07 volt.

Au bout de combien de temps le volume d'hydrogène dégagé sera-t-il de 112 $\overline{cm}^3$ dans les conditions normales de température et de pression?

On rappelle que 96 500 coulombs libèrent 1 g d'hydrogène et que le volume moléculaire normal est 22 400 $\overline{cm}^3$.

C. (Question absolument indépendante des trois premières.)

Un solénoïde de 1 000 spires réparties sur une longueur de 50 cm a son axe horizontal et perpendiculaire au méridien magnétique. Une petite aiguille aimantée est suspendue horizontalement en son centre par un fil sans torsion; elle porte un petit miroir concave qui forme l'image d'un point lumineux sur une échelle située à 1 m du miroir. Le solénoïde étant parcouru par un courant, l'image se déplace de 2 cm sur l'échelle. Quelle est l'intensité du courant?

La composante horizontale de l'induction magnétique terrestre vaut 0,2 gauss.

(Bacc. Grenoble.)

324. — Une bobine cylindrique de 3 m de longueur, dont l'axe XX′ est horizontal, a un diamètre extérieur de 8 cm. Sur la bobine est enroulée régulièrement une seule couche de fil de cuivre d'une longueur totale de 650 m.

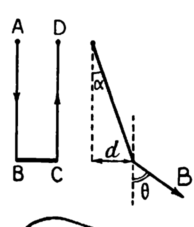
1° On fait passer dans le fil un courant de 0,75 ampère; trouver la valeur de l'induction magnétique au centre de la bobine.

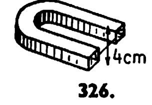
2° A l'intérieur de la bobine on dispose un barreau aimanté AB dont le moment magnétique vaut 2,4 unités M. K. S. A. Ce barreau est mobile autour d'un axe horizontal NN′ passant par son centre de gravité, qui coïncide avec le centre O de la bobine. L'axe NN′ est perpendiculaire à XX′.

Quel est le couple nécessaire pour maintenir l'aimant AB vertical?

(Bacc. Paris.)

325. — Un fil de cuivre BC, rectiligne et rigide, de longueur 10 cm et de diamètre 1,5 mm, est suspendu par deux fils conducteurs AB et CD, infiniment flexibles, de longueur 1 m et de masse négligeable (*fig. 326*). On fait passer un courant dans le sens ABCD.



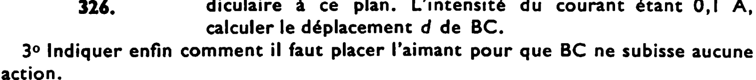


326.

Un aimant en fer à cheval crée entre ses branches un champ d'induction uniforme B de 400 gauss que l'on supposera brusquement limité à une largeur de 4 cm dans la direction perpendiculaire au plan du fer à cheval.

1° Indiquer clairement, en s'aidant d'un croquis, comment il faut placer l'aimant pour que BC puisse être soulevé par une force électromagnétique verticale. Calculer l'intensité minimum du courant pour que ce soulèvement ait lieu.

2° Indiquer de la même façon comment il faut placer l'aimant pour que BC s'écarte d'un angle α du plan vertical ABCD sous l'action d'une force électromagnétique perpendiculaire à ce plan. L'intensité du courant étant 0,1 A, calculer le déplacement d de BC.



3° Indiquer enfin comment il faut placer l'aimant pour que BC ne subisse aucune action.

4° On donne à l'aimant une position telle que l'induction B reste perpendiculaire à BC mais soit inclinée de l'angle θ sur la verticale. Etablir la formule générale donnant $\operatorname{tg} \alpha$ en fonction de θ.

5° On éloigne l'aimant et l'on oriente BC dans le plan du méridien magnétique. Montrer que ce fil peut se déplacer. Calculer l'intensité du courant lorsque le déplacement, mesuré à l'aide d'un microscope, est égal à 1 mm.

Densité du cuivre : 8,85.

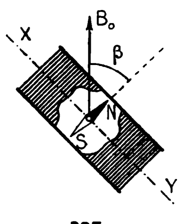
Composante horizontale de l'induction magnétique terrestre : 0,2 gauss.

Inclinaison : 64°45′.

326. — Une aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical est placée à l'intérieur d'un solénoïde d'axe horizontal XY (*fig. 327*). On peut orienter le solénoïde en le faisant tourner autour d'un axe géométrique qui coïncide avec celui de l'aiguille.

1° L'axe du solénoïde est orienté perpendiculairement à la direction de l'aiguille aimantée. On lance un courant i dans le solénoïde. De quel angle α tourne l'aiguille aimantée?

Application numérique : composante horizontale de l'induction magnétique terrestre B_0 : 0,2 gauss.
Nombre de spires du solénoïde : 1 000.
Longueur du solénoïde : 120 cm.
Intensité du courant : $i = 10$ milliampères.



327.

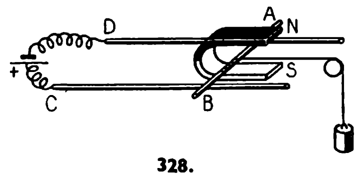
2° Le courant précédent étant maintenu, on fait tourner le solénoïde à partir de la position actuelle jusqu'à ce que l'aiguille aimantée se trouve parallèle au plan des spires. Calculer à ce moment l'angle β que forme l'aiguille avec le méridien magnétique? Combien y a-t-il de positions du solénoïde répondant à cette question?

3° On augmente progressivement la valeur de i. A partir de quelle intensité devient-il impossible de trouver une orientation du solénoïde répondant à la deuxième question?

(Bacc. Nancy.)

327. — Soit une barre de cuivre AB pouvant rouler sur deux rails de cuivre AD et BC, dont les extrémités C et D, sont reliées aux bornes d'un générateur de force électromotrice 10 volts et de résistance intérieure 0,12 ohm *(fig. 328)*.

Les rails et la barre AB ont une section de 0,5 $\overline{cm}^2$. AD = BC = 50 cm; AB = 20 cm. Résistivité du cuivre 1,6 microhm × cm.



328.

Le fil CD a une longueur de 50 cm et une section de 0,5 $\overline{mm}^2$.

1° Calculer l'intensité du courant qui s'établit dans le circuit.

2° On place un aimant en fer à cheval NS comme l'indique la figure. Ses branches mesurent 10 cm près de l'entrefer et il crée un champ d'induction magnétique uniforme égale à 100 gauss. Qu'observerait-on si la barre AB était libre? On attache au milieu de la barre un fil passant sur une poulie. Quel poids faut-il y suspendre pour immobiliser AB?

3° On remplace le poids par un ressort préalablement étalonné à l'aide des mesures suivantes :

charges :	0 g	5 g	10 g	15 g	20 g
longueurs du ressort :	20 cm	20,8 cm	21,6 cm	22,4 cm	23,2 cm.

Déterminer, à l'aide de la courbe d'étalonnage, l'allongement pris par le ressort.

(Bacc. Dijon.)

328. — Sur une bobine de 60 cm de longueur et de 20 $\overline{cm}^2$ de section sont enroulés 100 tours de fil équidistants. On fait passer dans ce fil un courant de 10 ampères. Calculer :

1° L'intensité B_0 de l'induction magnétique à l'intérieur de la bobine;

2° La valeur Φ du flux d'induction qui traverse normalement chaque section.

On introduit ensuite dans cette bobine un noyau de fer doux dont le coefficient de perméabilité relative est 2 000 pour l'induction trouvée précédemment.

Quelle sera l'induction B à l'intérieur du barreau? *(Bacc. Grenoble.)*

329. — Une bobine longue porte un enroulement de 10 spires par centimètre de longueur. Son axe horizontal est d'abord perpendiculaire au plan du méridien magnétique du lieu, où la composante horizontale de l'induction magnétique terrestre est de 0,2 gauss. Au centre de la bobine est une petite aiguille aimantée horizontale, suspendue à un fil sans torsion.

1° Calculer l'intensité I du courant qui doit passer dans la bobine pour que l'aiguille aimantée soit déviée de 45°.

2° La bobine est mobile autour d'un axe vertical passant par son centre. On la fait tourner, toujours dans le même sens, à partir d'une position initiale telle que

l'induction magnétique créée par la bobine en son centre soit parallèle à la composante horizontale de l'induction magnétique terrestre. Soient x et y les angles dont tournent respectivement, à partir de la position initiale, la bobine et l'aiguille aimantée.

Étudier et représenter graphiquement la variation de y en fonction de x en supposant que l'intensité du courant dans la bobine reste constante et diffère de la valeur I, par excès, puis par défaut, seulement d'une quantité extrêmement petite.

(Bacc. Bordeaux.)

330. — 1° Un générateur maintient entre deux points A et B une différence de potentiel constante quelle que soit l'intensité fournie. Les points A et B sont reliés entre eux par trois résistances AM_1B, AM_2B et AM_3B ayant respectivement pour valeur 5 ohms, 10 ohms, 50 ohms. La résistance AM_1B est plongée dans un calorimètre contenant 300 g d'eau et dont l'équivalent en eau est 63 g. Sachant qu'au bout de 16 mn 40 s la température de l'eau est passée de 15° à 31°, on demande :

a) l'intensité du courant traversant la branche AM_1B;

b) la différence de potentiel entre les points A et B;

c) l'intensité totale débitée par le générateur.

2° Quelle est la force électromotrice du générateur, sachant que sa résistance intérieure est 0,1 ohm et que la résistance des fils de connexion vaut 0,4 ohm?

3° On veut remplacer les trois résistances utilisées en A par une résistance unique traversée par le courant débité par le générateur. Quelle longueur faut-il donner à cette résistance, sachant que sa section est 0,1 $\overline{mm}^2$ et qu'un fil de même nature de 0,5 $\overline{mm}^2$ de section et de 1 m de longueur a une résistance de 0,16 ohm?

4° Cette résistance, traversée par le même courant, est enroulée en un solénoïde comprenant 20 spires par cm de longueur. Quelle est l'induction créée à l'intérieur de ce solénoïde? *(Bacc. Grenoble.)*

331. — Un circuit électrique est constitué par une batterie de 5 accumulateurs en série et une résistance R dont la valeur est 30 ohms. Chaque accumulateur a une force électromotrice de 2 volts et sa résistance intérieure est négligeable.

1° Quelle est l'intensité du courant dans le circuit? Quelle est la puissance développée par l'ensemble des générateurs dans le circuit?

2° Quelle est la quantité de chaleur dégagée par minute dans la résistance R?

3° On enlève la résistance R et on la remplace par trois résistances égales montées en dérivation aux bornes des accumulateurs. Chaque résistance en dérivation vaut 30 ohms. Quelle est la valeur de l'intensité qui traverse les accumulateurs? Quelle est la valeur de l'intensité du courant dans chaque résistance?

4° On enlève les résistances en dérivation et le circuit est maintenant constitué par les accumulateurs et un solénoïde. Le solénoïde est relié aux bornes de la batterie d'accumulateurs par des fils de jonction dont la résistance est négligeable.

Le solénoïde est placé horizontalement de manière que son axe soit perpendiculaire au plan du méridien magnétique. Le solénoïde a deux spires par centimètre de longueur. Une petite aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical se trouve dans la région centrale de la bobine. L'aiguille dévie de 45° quand le courant passe. Quelle est la résistance du solénoïde?

On rappelle que la composante horizontale de l'induction terrestre vaut 0,2 gauss.

(1re *C. M. Egypte* 1954.)

332. On a relié en série par des connexions de résistance négligeable :

a) une batterie d'accumulateurs de 6 éléments en série ayant chacun une f. é. m. de 1,5 volt et ayant au total une résistance de 0,1 ohm;

b) un solénoïde de 80 cm de long dont les spires jointives ont un rayon de 2,8 cm. Le fil conducteur, de faible résistivité ($\rho = 10 \times 10^{-6} \Omega \times$ cm) a 2 mm de diamètre;

c) un rhéostat de 100 ohms;

d) une roue de Barlow dont le disque de cuivre est mobile autour d'un axe horizontal. Le bord inférieur du disque affleure le mercure contenu dans une gouttière. Le

courant arrive par l'axe de rotation et sort par le mercure. Un fort aimant crée un champ magnétique d'induction uniforme horizontale normale au plan du disque. On admettra qu'aucune force ne s'oppose au mouvement du disque et que la résistance électrique de cet appareil est négligeable;

e) un voltamètre à eau acidulée. Dans les conditions de l'expérience, sa résistance est 1,66 ohms et sa force contre-électromotrice 0,6 volt.

Tous les appareils sont placés en série et constituent un circuit électrique unique fermé.

A. On supprime l'aimant, donc le champ magnétique à travers la roue de Barlow.

1° Calculer l'intensité I_1 du courant.

2° Calculer l'induction magnétique que ce courant I_1 crée au centre du solénoïde.

B. On installe l'aimant, la roue se met à tourner et le courant dans le circuit prend la valeur $I_2 = 0,5$ A.

1° Calculer la force contre-électromotrice et la puissance du moteur que constitue cette roue de Barlow.

2° Calculer le volume d'hydrogène recueilli à la cathode du voltamètre en une heure six minutes quarante secondes lorsqu'il est traversé par le courant $I_2 = 0,5$ A.

(1re C. M. A. O. F., Antilles et Guyane 1954.)

333. — Un galvanomètre dévie de 100 divisions lorsqu'il est parcouru par un courant de 100 microampères; la résistance de ce galvanomètre est 10 000 ohms. On met une résistance R en série avec le cadre pour utiliser ce galvanomètre comme voltmètre.

1° Quelle valeur faut-il donner à R pour que le cadre dévie de 100 divisions quand 10 volts sont appliqués à l'ensemble formé par le cadre et la résistance R?

2° Le voltmètre ainsi constitué est connecté aux bornes d'une batterie de piles; il dévie de 45 divisions. On place ensuite une résistance de 6 ohms aux bornes de la même batterie de piles; le voltmètre, toujours branché aux bornes de la batterie, ne dévie plus que de 30 divisions. Quelles sont la force électromotrice et la résistance intérieure de la batterie?

3° Cette batterie est formée de trois éléments identiques montés en série; quelles sont la force électromotrice et la résistance intérieure de chaque élément?

4° Le cadre du galvanomètre est un rectangle de 2 centimètres et 4 centimètres de côtés; il est placé dans un champ d'induction radial égale à 1 000 gauss. A quel couple est soumise une spire du cadre lorsqu'elle est parcourue par un courant de 100 microampères?

N. B. — 1° On rappelle que le microampère est le millionième de l'ampère.

2° Les solutions des 2e et 3e parties du problème sont indépendantes de celle de la première; la quatrième partie est indépendante des trois autres.

334. — On construit une bobine à l'aide d'un fil de maillechort isolé par un vernis, dont on négligera l'épaisseur. Voici quelques données relatives à cette bobine :

diamètre du fil, 0,8 mm;

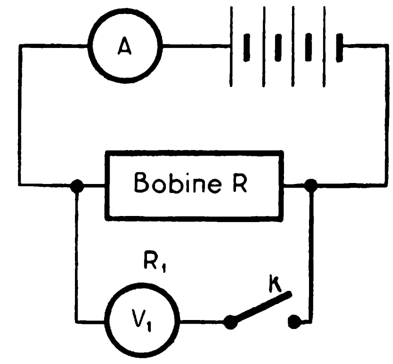
rayon d'une spire, 5 cm;

1 000 spires jointives en une seule couche de fil;

résistivité du fil, 31 $\mu\Omega$ cm.

1° Calculer, à l'aide de ces données, une valeur approchée de la résistance, R, de la bobine.

2° Afin de déterminer cette résistance R avec plus de précision, on réalise le montage de la *figure* 329.



329.

E est une batterie d'accumulateurs dont la résistance intérieure est négligeable et dont la force électromotrice est E = 130 V;

A est un ampèremètre *dont on ne peut négliger la résistance r*. On dispose aux bornes de la bobine un voltmètre V_1 dont la résistance est R_1.

Lorsque l'interrupteur, K, est ouvert (position de la figure), l'ampèremètre marque 0,5 A. Lorsqu'on ferme l'interrupteur K, on constate une brusque augmentation de l'intensité du courant dans le circuit de l'ampèremètre, qui marque alors 0,92 A, cependant que le voltmètre indique 84 V.

a) Expliquer la brusque augmentation de l'intensité et indiquer le défaut présenté par le voltmètre V_1.

b) Les données expérimentales précédentes permettent cependant de déterminer :

la résistance de l'ampèremètre;

la résistance de la bobine;

les intensités du courant dans la bobine et le voltmètre;

la résistance du voltmètre.

Faire ces déterminations.

c) On remplace V_1 par un voltmètre de qualité; quelle caractéristique essentielle doit-il présenter et quelles sont alors les indications de l'ampèremètre et du nouveau voltmètre V_2?

3° Calculer le couple auquel est soumis une aiguille aimantée placée perpendicuairement aux lignes de force de la bobine, lorsque l'interrupteur K est ouvert. On négligera l'induction magnétique terrestre.

On indique en outre que le moment magnétique de l'aiguille est 0,1 unités M.K.S.A.

(1re *C. M. Madagascar* 1955.)

335. — On considère deux fils verticaux AB et CD, de même longueur. Leurs extrémités supérieures A et D sont sur une même horizontale et la figure ABCD se trouve dans le plan du méridien magnétique. Ces deux fils traversent une plaque horizontale que AB coupe en M et CD en N. On donne MN = 10 cm. On place au milieu de MN une aiguille aimantée très petite, mobile autour d'un axe vertical. La composante horizontale de l'induction magnétique terrestre est 0,2 gauss.

1° On branche AB à l'aide de fils de jonction de résistance négligeable aux bornes d'un générateur de force électromotrice E et de résistance intérieure négligeable. L'aiguille aimantée dévie d'un angle α_1 tel que $\operatorname{tg} \alpha_1 = 0,4$. En déduire l'intensité i_1 du courant.

2° On branche ensuite CD, également par des fils de jonction de résistance négligeable, en dérivation avec AB et cela successivement de deux façons :

a) en joignant A à D et B à C;

b) en joignant A à C et B à D.

On observe des déviations, α_2 et α_3, et l'on constate que les tangentes de chacun de ces angles présentent avec $\operatorname{tg} \alpha_1$ une différence de 0,1. Indiquer sans calcul, mais en motivant la réponse, laquelle des deux expériences *a*) ou *b*) donne la déviation la plus grande. Calculer l'intensité du courant dans CD. Sachant que la résistance de CD est 2 ohms, calculer la force électromotrice E ainsi que la résistance de AB.

(1re *M. New York* 1955.)

336. — 1° Pour déterminer la valeur R d'une résistance, on dispose d'un générateur, d'un ampèremètre et d'un voltmètre. Faire le schéma d'un montage permettant cette mesure.

Au cours des mesures on trouve une intensité I = 1,55 ampère et une différence de potentiel de 3,1 volts. Quelle est la valeur de R?

Sachant que les lectures sont faites à 0,01 ampère et à 0,05 volt près, quelle est l'incertitude relative sur la valeur de R, qui correspond à ces lectures.

2° Un solénoïde est construit avec un fil isolé (dont l'isolant a une épaisseur négligeable) de résistivité 24 microhms-centimètre, de diamètre d = 1 millimètre. Il comprend 500 spires de 5 cm de rayon. Quelle est la résistance du solénoïde?

3° Une portion de circuit comprend entre ses extrémités A et B un voltamètre à eau acidulée et, en série, la résistance R et le solénoïde montés en parallèle.

En 193 secondes se dégage un volume d'hydrogène qui, ramené aux conditions normales, est égal à 11,2 centimètres cubes. Quelle est l'intensité du courant traversant le voltamètre?

Sachant que la décomposition d'une mole (ou molécule-gramme) d'eau exige une énergie de 288 000 joules, calculer la force contre-électromotrice du voltamètre.

La différence de potentiel aux bornes du voltamètre étant égale à 4,5 volts, quelle est sa résistance?

Calculer l'intensité du courant traversant le solénoïde.

Déterminer par un procédé graphique (en prenant une échelle convenable) l'induction magnétique existant au centre du solénoïde résultant de la composante horizontale de l'induction terrestre et de celle due au courant sachant que l'axe du solénoïde fait un angle de 60° avec le méridien terrestre et que la composante horizontale de l'induction magnétique terrestre est égale à 0,20 gauss.

(Bacc. C'. M'. juin 1957.)

337. — Une barre de cuivre MN (*fig. 330*) peut glisser sur deux rails fixes, métalliques, parallèles, horizontaux AC, A'C' qui sont reliés par un conducteur AA'. La barre MN reste toujours perpendiculaire aux rails. On crée un champ d'induction magnétique uniforme vertical, dirigé de bas en haut et d'intensité $B = 1$ tesla; le fil de jonction AA' a une résistance de 0,2 ohm; toutes les autres résistances sont négligeables. L'écartement des rails est 10 cm.

330.

1° On déplace la barre avec une vitesse constante de 2,8 m/s dans le sens de la flèche. Montrer que le circuit AMNA' est parcouru par un courant dont on donnera le sens. Calculer l'intensité de ce courant.

2° Calculer la force qu'il faut exercer sur la barre pour maintenir constante la vitesse précédente.

3° Quand la distance AM est égale à 56 cm, on abandonne la barre MN puis on annule brusquement l'induction B. Expliquer les phénomènes qui se produisent. La barre MN a-t-elle tendance à se déplacer et dans quel sens? Calculer la quantité d'électricité induite au cours de cette dernière expérience.

338. — Un circuit comprend, disposés en série : un générateur de f. é. m. 20 volts et de résistance négligeable; une résistance de 5 ohms plongée dans un calorimètre dont la masse en eau est 200 g et dont la température s'élève de 1,435 °C par minute; un solénoïde de longueur 1 m, de 15 cm de diamètre formé de spires jointives d'un fil conducteur de résistivité $1{,}5\ 10^{-6}$ ohm $\times$ cm.

1° Calculer l'intensité débitée par le générateur et la résistance du solénoïde.

2° En déduire le diamètre du fil constituant le solénoïde. Quel est le nombre de spires bobinées en négligeant l'épaisseur de l'isolant.

3° Calculer l'induction créée par le courant au centre du solénoïde, induction que l'on supposera uniforme.

4° On place au centre de ce solénoïde S une petite bobine Δ formée de 1 000 spires de 12 cm de diamètre, de résistance 100 Ω. Cette bobine Δ est mobile autour d'un axe horizontal perpendiculaire à l'axe du solénoïde S. Étant d'abord disposée de façon que le plan des spires soit parallèle à l'axe de S, on la fait tourner rapidement de 90°. La bobine Δ étant reliée à une résistance extérieure négligeable, calculer la quantité d'électricité induite au cours de cette rotation.

MIROIRS PLANS

339 — Une bougie allumée est placée à 1,50 m d'une armoire à glace et exactement dans l'axe du panneau réfléchissant (l'axe en question est la droite normale au panneau et passant par son centre de figure). On fait tourner le panneau de 60° autour de sa charnière. On demande :

1° de dire suivant quelle courbe se déplace l'image de la source pendant que le miroir tourne;

2° de calculer le chemin franchi par l'image au cours de cette rotation;

3° de trouver la distance de l'image à l'objet dans la nouvelle position du miroir. La largeur du panneau est de 1 m. *(Bacc. Clermont.)*

340. — De la fenêtre de votre chambre, et d'un point O de cette fenêtre situé à une distance h du sol vous apercevez l'image P′ d'un objet élevé P provenant de rayons réfléchis par une petite flaque d'eau S placée au niveau du sol en face de la fenêtre et à une distance AS = d du mur dans lequel la fenêtre a été percée. Ayant disposé horizontalement en O une lame de verre L pouvant tourner autour d'un axe horizontal convenablement orienté passant par O, vous constatez qu'il faut incliner la lame d'un angle α pour apercevoir dans la même direction l'image P′ vue à travers la lame et l'image P″ de P provenant des rayons réfléchis sur la lame. Déduire de cette observation la hauteur H de l'objet P au-dessus du sol. On effectuera le calcul numérique pour $h = d = 12$ m et $\alpha = 3°$. *(Bacc. Paris.)*

341. — A un mètre d'un miroir plan et parallèlement à celui-ci, on place un écran plan opaque percé d'un petit trou. Par ce trou, un rayon lumineux tombe normalement sur le miroir. En inclinant légèrement ce dernier, on constate que le rayon réfléchi donne sur l'écran un point éclairé à 2 cm du trou. De quel angle a-t-on fait tourner le miroir? *(Bacc. Besançon.)*

342. — 1° Un miroir plan a la forme d'un cercle de centre O et de rayon $r = 6$ cm. Il est placé en face d'un écran, à 10 m de distance. Une source de lumière, ponctuelle, est disposée dans un plan parallèle à l'écran et au miroir, situé entre les deux, à 1 m du miroir. Quel est le diamètre du cercle éclairé sur l'écran par les rayons réfléchis sur la surface du miroir?

La source ponctuelle étant à 10 cm de la normale au miroir passant par son centre, à quelle distance de cette normale se trouve le centre du cercle éclairé? *(D'après Bacc. Égypte.)*

343. — Deux miroirs plans tournant leurs faces réfléchissantes l'une vers l'autre forment un dièdre d'angle plan égal à 45°. Calculer l'angle d'un rayon incident avec le rayon ayant subi deux réflexions. Trouver l'image d'un objet après deux réflexions; cette image est-elle superposable à l'objet?

Chacun des miroirs a la forme d'un carré de 20 cm de côté; un faisceau de rayons parallèles arrive sur le premier miroir sous un angle d'incidence de 22,5°, se réfléchit deux fois; calculer la surface de la section du faisceau deux fois réfléchi par un plan normal à ce faisceau.

344. — On dispose de deux miroirs plans formant un dièdre rectangle. Trouver l'image d'un objet après réflexion sur chacun des miroirs. Comment cette image se déduit-elle de l'objet?

Deux systèmes identiques au précédent sont placés de façon que les arêtes des dièdres soient orthogonales. Les rayons issus d'un objet viennent ainsi se réfléchir successivement sur les quatre miroirs. Comment l'image finale se déduit-elle de l'objet? On raisonnera avec un objet plan perpendiculaire à une droite orthogonale aux deux arêtes des dièdres formés par les miroirs.

345. — Un rayon lumineux arrive sur un petit miroir plan m qui tourne autour d'un axe avec une vitesse de 500 tours/seconde; le rayon réfléchi rencontre ensuite nor-

malement un miroir plan fixe M situé à 15 m du premier, revient sur le miroir tournant et s'y réfléchit de nouveau. Sachant que la lumière se propage dans l'air avec une vitesse de 300 000 km/s., calculer l'angle dont le petit miroir a tourné pendant que le rayon lumineux a parcouru la distance mM aller et retour. En déduire l'écart angulaire du rayon incident et du rayon ayant subi les réflexions sur m, sur M, puis sur m. Cet angle est-il appréciable et sa mesure peut-elle servir à calculer la vitesse de la lumière?

RÉFRACTION — PRISME

346. — Le fond d'une cuve de verre porte un point de mire M défini par le croisement de deux traits fins rectangulaires. Cette mire est sur l'axe optique vertical d'un microscope de faible grossissement que l'on a placé de manière à réaliser successivement la mise au point sur la mire M d'abord à travers l'air puis à travers une couche d'eau d'épaisseur $h = 8$ mm surmontée d'une couche de benzine d'épaisseur $h' = 9$ mm. Le déplacement nécessaire est de $d = 5$ mm. En déduire l'indice usuel de la benzine. L'indice usuel de l'eau est $\frac{4}{3}$. *(Bacc. Guadeloupe.)*

347. — Sur la base de centre B d'un cylindre de rayon r et d'indice n, est appliquée en B une petite lame C à faces parallèles et d'indice $n' < n$. On demande à quelle distance maximum MN de la base du cylindre devra pénétrer un rayon lumineux pour que ce rayon, traversant le cylindre suivant MB, subisse en B la réflexion totale. On indiquera à quelle hauteur le rayon sort du cylindre et sous quelle incidence il y pénètre. Condition de possibilité.

Application numérique : $n = 1{,}612$; $n' = 1{,}314$; $r = 1{,}34$. *(Bacc. Grenoble.)*

348. — Un bloc de verre dont l'indice sera supposé égal à $\sqrt{2}$ a la forme d'une moitié de cylindre à base circulaire. Sa section droite est donc un demi-cercle ABC de centre O. Dans cette section et sous l'incidence de 45° tombent trois rayons de lumière simple · SO, au centre; SA, au bord; SM, en un point intermédiaire M. On demande 1° quelle déviation subira SO dans son passage à travers le bloc; 2° comment le point M doit partager le rayon OA pour que le rayon émergent provenant de SM sorte parallèle à sa direction d'entrée; 3° quel sera le trajet du rayon SA, en quel point sortira-t-il et dans quelle direction? *(Bacc. Strasbourg.)*

349. — Un miroir est constitué par une lame à faces parallèles d'épaisseur 2 cm et d'indice $n = 1{,}5$ dont la face postérieure est argentée. Un objet se trouve à 1 m devant ce miroir; déterminer son image provenant de la réflexion sur la face argentée. Peut-on remplacer ce miroir épais par une seule face plane réfléchissante? Déterminer la position de ce miroir équivalent.

350. — Un prisme isocèle rectangle a pour indice $n = \frac{3}{2}$; la section droite est un triangle rectangle dont le côté de l'angle droit a une longueur de 5 cm. Un rayon lumineux pénètre normalement dans le prisme et se réfléchit totalement sur la face hypoténuse; sur ce rayon et à 50 cm de la face d'entrée se trouve un point lumineux P. Déterminer les images successives de P données par le dioptre plan, le miroir constitué par la face hypoténuse puis le deuxième dioptre plan. L'image d'un objet est-elle superposable à l'objet?

On utilise le prisme pour des faisceaux entrant par la face hypoténuse et subissant deux réflexions totales; résoudre les mêmes questions.

351. — Un prisme isocèle rectangle d'indice $n = 1{,}5$ reçoit un faisceau qui se réfléchit à l'intérieur du prisme sur sa face hypoténuse. Quel est l'angle d'incidence sur la face d'entrée tel que le rayon subisse juste la réflexion totale? Les rayons d'un

faisceau convergent arrivant en un point de la face d'entrée forment des angles d'incidence maxima égaux à 45° de part et d'autre de la normale.

Déterminer dans ce faisceau les rayons qui subissent ou non une réflexion totale sur la face hypoténuse.

Représenter la marche des rayons dans un plan de section principale et calculer les angles d'émergence correspondant aux rayons extrêmes.

352. — Une cuve parallélépipédique contient une couche d'eau d'indice $n = \frac{4}{3}$ et d'épaisseur 12 cm.

1° Trouver, en rayons normaux à la surface libre, l'image d'un point A situé au fond de la cuve.

2° On verse sur l'eau une couche de benzène d'indice $n' = \frac{3}{2}$ et de 15 cm d'épaisseur. Quelle est l'image de A à travers les deux liquides?

3° Un rayon incident se propage dans l'air, se réfracte dans le benzène, puis dans l'eau. Peut-il subir une réflexion totale à la surface benzène-eau?

4° Un rayon provenant du fond de la cuve se propage dans l'eau puis dans le benzène et arrive à la surface libre; peut-il subir une réflexion totale? Préciser les angles d'incidence sur les deux dioptres.

353. — Une cuve prismatique d'angle au sommet MON = 30° est remplie d'un liquide d'indice n (compris entre 1,30 et 1,70).

Un rayon lumineux tombe normalement sur la face d'entrée OM, traverse le prisme, et sort après avoir éprouvé une déviation D.

1° Quelle relation existe-t-il entre l'angle d'émergence i' et l'indice n du prisme?

2° Tracer avec précision et en indiquant les échelles choisies, la courbe représentant la variation de l'indice en fonction de la déviation D.

3° Au lieu de tomber normalement sur la face d'entrée, le rayon lumineux fait avec la normale à cette face un angle de 0°,5 vers le sommet du prisme. Calculer la déviation D′ subie par le rayon lorsque la cuve est remplie de sulfure de carbone (n = 1,64). Comparer avec le résultat obtenu pour le même liquide lorsque le rayon tombe normalement sur la face d'entrée.

(Bacc. Bordeaux.)

354. — Déterminer l'indice de réfraction du liquide qui doit être contenu dans un prisme creux, d'angle 6°, pour que la déviation imprimée à un pinceau lumineux (tombant sous une incidence peu différente de l'incidence normale) soit annulée par un prisme solide d'angle 4°, et d'indice 1,5 accolé au premier prisme.

(Bacc. Toulouse.)

355. — On donne un prisme d'angle réfringent A = 60°, et d'indice $n = \sqrt{3}$.

1° On considère un rayon tombant sur le prisme sous l'angle i = 90°. S'il sort du prisme sous l'angle i', calculer sin i'. Montrer que i' est très voisin de 45° et légèrement supérieur.

2° Sous quel angle i_1 doit tomber un rayon pour sortir sous l'incidence $i'_1 = 90°$? Que devient le rayon tombant sous l'incidence de 45°?

3° Quelle est l'incidence i_0 correspondant au minimum de déviation? Calculer la déviation minimum correspondante.

4° Représenter sur une figure l'ensemble des rayons qui traversent le prisme en tombant en un point I de la face d'entrée. On dessinera en pointillé celui de ces rayons qui subit la déviation minimum.

(Bacc. Nancy.)

356. — Un pinceau de lumière parallèle monochromatique se propage horizontalement et tombe sur la division 50 d'une règle verticale divisée en centimètres, dont le zéro est en haut. Un prisme de petit angle A est introduit dans le faisceau de façon que son arête horizontale soit normale aux rayons et située à 3 m de la règle.

1° On oriente le plan bissecteur de A parallèlement au faisceau. La lumière chevauche le dièdre, se réfléchit dans l'air sur ses faces et vient former sur la règle deux taches situées aux divisions 18,6 et 81,4. En déduire A en degrés.

2° On fait tourner le prisme autour de son arête de 1° vers le bas; trouver la nouvelle position des taches.

3° On continue la rotation dans le même sens jusqu'à ce que le plan bissecteur de A soit normal au pinceau. Dans cette position, la lumière qui traverse le prisme forme sur la règle une tache située à la division 65,7.

En déduire l'indice du prisme.

(Bacc. Nancy.)

357. — Sur un prisme, dont l'angle est de 2°, on fait tomber, sous une très faible incidence, un pinceau de rayons parallèles monochromatiques, pour lesquels l'indice du prisme est 1,63; quelle sera la déviation du pinceau de rayons?

On recommence l'expérience, le prisme étant maintenant plongé dans l'eau, dont l'indice est de 1,33 pour ces mêmes rayons; quelle sera la déviation?

(Bacc. Caen.)

358. — Un prisme de verre a sa première face en contact avec de l'air et sa deuxième avec de l'eau; les indices par rapport à l'air sont pour le verre $\frac{3}{2}$, et pour l'eau $\frac{4}{3}$. On demande :

1° D'étudier la marche d'un rayon situé dans une section principale de ce prisme.

2° Ce calculer les déviations de deux rayons qui font, avec la normale à la face d'entrée, des angles d'incidence égaux à 3°. On supposera l'angle du prisme égal à 4° et on confondra le sinus d'un petit angle avec l'arc trigonométrique correspondant.

(Bacc. Paris.)

359. — On fait tomber normalement, sur la face d'entrée AB d'un prisme, un rayon de lumière monochromatique. On constate que ce rayon sort du prisme en faisant, avec la normale à la face de sortie AC, un angle de 47° 30′.

1° Sachant que le verre dont est fait le prisme a un indice égal à 1,52, on demande quelle est la valeur de l'angle au sommet, A, de ce prisme.

2° Que deviendrait l'angle d'émergence si, au contact de la face de sortie AC, on remplaçait l'air par de l'eau d'indice 1,33?

3° On utilise maintenant ce prisme au minimum de déviation et on l'éclaire avec la même radiation monochromatique. Quel est l'angle que fait le rayon émergent avec le rayon incident? Quel est l'angle que fait ce même rayon émergent avec la normale à la face de la sortie AC?

(1re C. M. Réunion 1954.)

360. — Un prisme d'angle 60° a un indice égal à 1,414 (que l'on pourra confondre avec $\sqrt{2}$) pour la radiation moyenne du spectre.

1° Déterminer l'angle d'incidence correspondant à la déviation minimum, ainsi que la valeur de cette déviation minimum.

2° Quelle doit être la valeur de l'angle d'incidence pour que le rayon subisse une réflexion totale sur la deuxième face du prisme?

3° On fait arriver un faisceau parallèle de lumière blanche sous l'angle d'incidence correspondant au minimum de déviation pour la radiation moyenne. Calculer la valeur de la déviation pour la radiation rouge ($n = 1,389$) puis pour la radiation violette ($n = 1,458$). En déduire l'angle de dispersion à la sortie du prisme.

361. — Un prisme creux d'angle 60° a son arête verticale. Il contient deux liquides superposés : de l'eau d'indice $n_1 = \frac{4}{3}$ et du benzène d'indice $n_2 = \frac{3}{2}$. Un faisceau parallèle de lumière monochromatique arrive sur la totalité du prisme sous un angle d'incidence correspondant à la déviation minimum pour le prisme d'eau.

1° Calculer cet angle d'incidence et la déviation minimum provoquée par le prisme d'eau.

2° Calculer la déviation subie par la partie du faisceau qui traverse le prisme de benzène. En déduire l'angle des deux faisceaux à la sortie de ce prisme.

362. — Décrire une expérience montrant l'existence du minimum de la déviation produite par un prisme. Faire ensuite les calculs suivants relatifs à cette expérience :

1° Le prisme étant un prisme de verre d'indice 1,5 et d'angle au sommet 60 degrés, tracer la marche des rayons correspondant à la déviation minimum, calculer les angles de réfraction et d'incidence relatifs à cette déviation, ainsi que la valeur de la déviation.

2° Considérer un rayon dont l'angle d'incidence excède de dix degrés l'angle d'incidence correspondant au minimum de déviation; suivre la marche de ce rayon en calculant les angles dont on aura besoin, puis la déviation et montrer qu'elle est supérieure à la déviation minimum.

(1re partie C′ et M′ 1954.)

LENTILLES

363. — Une lentille convergente a 20 cm de distance focale. Elle donne du Soleil une image dont on demande la grandeur, la tangente trigonométrique du demi-diamètre apparent du Soleil étant prise égale à $\frac{1}{200}$.

Pour obtenir une image plus grande on interpose entre la lentille précédente et son plan focal image une lentille divergente de 5 cm de distance focale. On demande :

1° Quelle devra être la distance de cette deuxième lentille à la première pour que l'image obtenue soit 5 fois plus grande que dans le premier cas ;

2° La distance de cette image à la première lentille.

On fera la construction géométrique de l'image.

(Bacc. Nancy.)

364. — 1° Une lentille mince convergente sert à faire sur un écran (verre dépoli ou plaque photographique) l'image d'un objet situé à l'infini sur son axe. L'image est au point lorsque l'écran est à 20 cm de la lentille.

Quelles sont la distance focale et la puissance en dioptries de la lentille?

2° Dans quel sens faut-il déplacer l'écran et de combien lorsque l'objet vient à 80 cm de la lentille?

3° Deux lentilles identiques à la précédente sont placées à 10 cm l'une de l'autre. A quelle distance de la seconde lentille faut-il placer l'écran pour mettre au point l'image d'un objet à l'infini?

4° Les choses étant ainsi disposées, on place normalement à l'axe une lame de verre à faces parallèles d'épaisseur 2 cm et d'indice 1,5 :

a) avant la première lentille;

b) après la deuxième et contre elle;

c) entre les deux.

Quelle doit être, dans les trois cas *a*), *b*), *c*), la distance de l'écran à la deuxième lentille pour la mise au point d'un objet à l'infini?

(Bacc. Alger.)

365. — 1° Devant une lentille convergente est placée une petite droite lumineuse, de longueur 2 cm, perpendiculaire à son axe principal. Sa distance à la lentille est 25 cm. On obtient ainsi une image réelle située à 75 cm de la lentille. Calculer la grandeur de l'image et la distance focale de la lentille.

2° Cette lentille est biconvexe et a deux faces de même rayon. Calculer ce rayon, connaissant l'indice de la lentille, 1,5.

3° Entre la lentille et l'image on dispose une lame à faces parallèles, perpendiculaire à l'axe de la lentille, d'indice 1,5 d'épaisseur 15 cm. Dans quel sens et de combien se trouve déplacée l'image? Quelle est sa nouvelle grandeur?

(Bacc. Liban.)

366. — Une lentille divergente C, dont la distance focale est de 1 m, est placée entre un écran E, qui est à 2 m à droite de la lentille, et un diaphragme D, placé à 1 m à gauche de la lentille et percé d'une ouverture circulaire O, de 1 cm de diamètre, centrée sur l'axe de la lentille.

1° On supposera qu'une étoile est placée sur l'axe de la lentille, à l'infini à gauche, et on déterminera le diamètre de la tache lumineuse qu'elle produit sur l'écran E.

Ce diamètre change-t-il quand la direction de l'étoile s'écarte un peu de l'axe?

2° On remplacera l'étoile par le soleil, dont le diamètre apparent sera pris égal à $\frac{1}{100}$ (l'unité d'angle étant le radian), et on déterminera le diamètre de la nouvelle tache lumineuse qui se produit sur l'écran E.

(Bacc. Paris.)

367. — On considère un prisme de verre dont la base est un triangle rectangle isocèle ABC. Sa face hypoténuse, AC, est recouverte d'une feuille de papier qui a été trempée dans l'eau, de telle sorte que tout se passe, au point de vue optique, comme si cette face était plongée dans l'eau.

La face BC de ce prisme reçoit un faisceau de lumière formé de rayons parallèles.

1° On constate que la réflexion totale n'a lieu, sur la face AC, que si l'angle d'incidence des rayons sur la face BC est supérieur à $i_0 = 24°50'$; l'angle de réfraction limite correspondant est de 61°. Déterminer : *a*) l'indice du verre dont est constitué le prisme, par rapport à l'eau; — *b*) l'indice du verre par rapport à l'air; — *c*) l'indice de l'eau par rapport à l'air.

$\sin 24°50' = 0{,}420 \qquad \sin 61° = 0{,}875, \qquad \sin(61 - 45)° = \sin 16° = 0{,}276.$

2° La lumière pénétrant par la face BC sous l'incidence i_0, réfléchie sur AC, sort du prisme par la face AB.

Déterminer l'angle formé par les rayons émergents et les rayons incidents, c'est-à-dire l'angle de déviation du faisceau.

3° Le faisceau incident de lumière parallèle est produit au moyen d'une lentille de 30 cm de distance focale, au foyer de laquelle est placée une source ponctuelle S, et le faisceau émergent est reçu sur une deuxième lentille, identique à la première, dont l'axe principal est parallèle aux rayons émergents.

a) Tracer la marche d'un faisceau lumineux issu de S.

b) On fait tourner le prisme autour d'un axe parallèle à ses arêtes, d'un angle α, de façon que l'angle d'incidence devienne $i_0 + \alpha$. Déterminer la nouvelle valeur de l'angle de déviation et le déplacement de l'image de S donnée par la deuxième lentille. Construire aussi dans ce cas la marche d'un faisceau issu de S. Application numérique : $\alpha = 1°$.

(Bacc. Rennes.)

368. — Une lentille sphérique, mince, biconvexe, d'indice $\frac{3}{2}$, dont les faces ont pour rayons : $R = 20$ cm et $R' = 30$ cm reçoit parallèlement à son axe, qui est vertical, un faisceau de lumière parallèle qui, à sa sortie de la lentille, vient frapper une nappe de mercure MN, formant miroir.

1° A quelle distance du mercure faut-il placer la lentille pour que les rayons réfléchis viennent converger réellement ou virtuellement, en des points S_1 et S_2 situés l'un à 10 cm au-dessus de MN, l'autre à 10 cm au-dessous de MN?

2° Vers quels nouveaux foyers viendront converger les faisceaux issus de S_1 et S_2, après avoir traversé la lentille en sens inverse?

(Bacc. Clermont.)

369. — 1° Sur une lentille plan-convexe, infiniment mince, dont le rayon de courbure est 25,6 cm, on fait tomber un faisceau parallèle de lumière constituée par deux radiations simples, l'une rouge et l'autre violette. Les indices de la substance de la lentille sont, pour les deux radiations considérées, respectivement : $n_1 = 1{,}512$ et $n_2 = 1{,}532$. On demande quelles sont les distances focales de cette lentille pour les deux radiations.

2° On dispose, contre la lentille précédente, une autre lentille infiniment mince, plan-concave, dont les deux indices pour les deux lumières considérées sont respectivement : $n'_1 = 1{,}610$ et $n'_2 = 1{,}650$. On demande quel doit être le rayon de courbure de cette seconde lentille, pour que les deux foyers du système constitué par l'ensemble soient confondus pour les deux radiations.

(Bacc. Aix-Marseille.)

370. — Pour observer, de son siège, la route derrière sa voiture, un automobiliste a installé contre la glace arrière, supposée verticale, une lentille divergente L de 62,5 cm de distance focale et de 20 cm d'ouverture.

Un petit miroir plan M circulaire légèrement incliné permet à l'observateur, dont l'œil est en O entre L et M, de voir la route à travers la lentille. On donne MO = 50 cm, ML = 2 m.

1° Expliquer les rôles de la lentille et du miroir. Indiquer les avantages et les inconvénients de ce dispositif.

2° Calculer l'angle du champ obtenu :

a) avec la lentille;

b) sans la lentille (en supposant la glace arrière de même dimension que la lentille).

Quelle serait approximativement la surface de la portion d'espace visible dans un plan vertical situé à 10 m de l'arrière de la voiture? Faire le calcul dans les deux cas, *a* et *b*.

3° Construire l'image, donnée par le système lentille-miroir, d'un petit objet placé à 5 m derrière la voiture.

(Bacc. Besançon.)

371. — Une cuve de verre, dont les faces parallèles AB, CD sont d'épaisseur négligeable, a la forme d'un parallélépipède rectangle de longueur AC = 30 cm. Une lentille convergente mince L de 5 dioptries, dont le centre optique O est 10 cm en arrière de CD, a son axe principal normal aux faces. Cet axe rencontre AB au point P.

1° La cuve étant d'abord vide, déterminer la position P′ de l'image de P.

On remplit la cuve d'un liquide transparent. L'image de P occupe alors une position P″ telle que P′P″ = 12 cm. Quel est l'indice du liquide?

2° Tracer la marche d'un faisceau conique divergent se propageant de P en P″ à travers ce système optique.

(D'après Bacc. Rennes.)

372. — Une lentille plan convexe, en verre d'indice $\frac{3}{2}$, dont la face courbe a pour rayon 50 cm, a son axe dirigé vers une étoile.

1° Quelle est la position de l'image E′ de l'étoile?

2° On place devant la lentille (du côté de l'étoile) une lame de verre d'indice $\frac{3}{2}$, à faces rigoureusement planes et parallèles, d'épaisseur 6 cm; cette lame est disposée normalement à l'axe de la lentille. Qu'y a-t-il de changé dans la position de l'image E′? Le résultat est-il modifié si on incline la lame par rapport à l'axe?

3° On place ensuite la lame entre la lentille et l'écran, normalement à l'axe. Que devient la position de l'image E′? Que se passe-t-il si on incline légèrement (de 2° par exemple) la lame par rapport à l'axe?

On rappelle la formule donnant la distance focale d'une lentille biconvexe $\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right)$ n étant son indice, R et R′ les rayons de courbure de ses faces.

(Bacc. Dijon.)

373. — 1° Une petite droite lumineuse réelle AB est placée perpendiculairement à l'axe principal d'une lentille mince L convergente de + 10 dioptries, à 40 cm de son centre optique O. Déterminer par le calcul la position de l'image de AB.

Expliquer comment on doit procéder pour faire la construction géométrique de cette image et dessiner la figure à une échelle suffisante (3 cm pour 10 cm par exemple).

Tracer la marche des rayons et celle d'un pinceau lumineux issu de A.

2° On dispose à 10 cm de l'autre côté de la lentille L une lentille mince L′ divergente de — 20 dioptries centrée sur le même axe. On déplace AB de l'infini à gauche au centre optique O de L. A quelles distances maximum et minimum de O doit se trouver AB pour que le système optique en donne une image réelle?

3° Un observateur situé dans un avion qui plane à 500 m d'altitude veut photographier le terrain. Pour cela, il rapproche les deux lentilles L et L′ à 6 cm l'une de l'autre et se sert de l'ensemble comme objectif d'un appareil photographique. L'axe principal commun aux deux lentilles est disposé verticalement et la lentille convergente L tournée vers le sol. A quelle distance de L′ faut-il placer la plaque sensible pour obtenir une image nette?

Quelle surface de terrain pourra être photographiée sur une plaque 13 × 18 cm?

(Bacc. Rennes.)

374. — Devant une lentille convergente se trouve une fente lumineuse, perpendiculaire à l'axe et de 2 cm de longueur. La lentille donne de la fente une image, que l'on reçoit sur un écran perpendiculaire à l'axe et situé à une distance fixe de 1 m 25 de la fente. On constate que l'on obtient une image nette pour deux positions de la lentille distantes de 75 cm.

1° Quelle est la convergence de la lentille?

2° Quelles sont les dimensions des deux images obtenues?

3° Qu'arriverait-il si l'on faisait varier la distance de l'écran à la fente? La mise au point serait-elle toujours possible?

(Bacc. Dijon.)

375. — On considère deux lentilles minces C et D qui restent toujours centrées sur le même axe. C est une lentille convergente de 2 dioptries et D une lentille divergente de 4 dioptries.

1° Dans une première disposition, les deux lentilles sont accolées et un objet de 2 cm de longueur est placé à 1 m de l'ensemble. Quelles sont la nature, la position et la grandeur de l'image obtenue?

2° Dans une deuxième disposition, C et D sont distantes de 25 cm. Tracer la marche d'un faisceau de rayons parallèles à l'axe commun tombant sur la lentille C et traversant le système.

3° Les lentilles étant toujours distances de 25 cm, on place à 50 cm en avant de la lentille C un objet lumineux, perpendiculaire à l'axe, de 2 cm de longueur, dont une extrémité est sur l'axe. Quelles sont la nature, la position et la grandeur de l'image de cet objet à travers le système considéré? Tracer la marche du faisceau lumineux issu du point de l'objet qui n'est pas sur l'axe.

(Bacc. Aix-Marseille.)

376. — 1° On considère une lentille plan-convexe dont le verre a pour indice par rapport à l'air 1,52. Le rayon de courbure de sa face convexe est 25 cm. On demande la convergence et la distance focale de cette lentille.

2° Cette lentille et une autre lentille identique sont centrées sur le même axe et disposées de manière que leurs faces convexes se touchent. On demande de déterminer la position et la grandeur de l'image donnée par ce système optique

d'un objet linéaire AB de 3 cm de longueur, placé perpendiculairement à l'axe à une distance de 1 m du système. Le point A est sur l'axe.

3° On remplit d'eau l'espace compris entre les lentilles (ce qui équivaut à intercaler une lentille mince d'eau entre les deux lentilles de verre.) On demande de déterminer la position et la grandeur de l'image de l'objet AB à travers le nouveau système optique ainsi formé. — Indice de l'eau : $\frac{4}{3}$.

(Bacc. Aix-Marseille.)

377. — 1° Un objet rectiligne AB et un écran E sont fixés parallèlement à 80 cm l'un de l'autre. En déplaçant entre eux une lentille convergente L dont l'axe est perpendiculaire à AB, on trouve une seule position de L donnant une image nette de AB sur l'écran et, pour cette position de L, l'image a même grandeur que l'objet; en déduire la distance focale de L.

2° Entre la lentille L et l'écran E, on interpose une lentille divergente L′ de distance focale f' égale à 10 cm et placée à 20 cm de L. Comment et de combien faut-il déplacer l'objet AB pour que l'image définitive, donnée par l'ensemble des deux lentilles L et L′ se forme de nouveau sur l'écran?

3° Quelle est la grandeur de cette dernière image par rapport à l'objet?

(Bacc. Besançon.)

378. — Le système optique à étudier comprend une lentille mince convergente L d'une distance focale $f = 50$ cm suivie d'un miroir plan M normal à l'axe de la lentille et dont la face antérieure réfléchissante se trouve à la distance $\frac{3}{2}f = 75$ cm de la lentille.

Tout rayon lumineux traverse la lentille, se réfléchit sur le miroir et repasse par la lentille.

1° Trouver l'image définitive que le système donne d'un point lumineux situé : *a*) à l'infini sur l'axe; — *b*) à la distance $2f$ de la lentille.

Tracer la marche des rayons lumineux.

2° Image d'un point quelconque P à la distance $OP = p$ de la lentille L. Trouver l'expression générale donnant la position de cette image. Vérifier les cas précédents.

3° On interpose devant le miroir M une glace de 3 cm d'épaisseur et d'indice $n = \frac{3}{2}$. Comment se trouve modifiée l'image du point à l'infini?

(Bacc. Bordeaux.)

379. — Soit une lentille convergente O_1, de 4 dioptries. Une fente lumineuse F éclairée en lumière blanche et perpendiculaire à l'axe principal est située à 30 cm de la lentille O_1. Sur le trajet de la lumière, situé à 1 m de la lentille, est un miroir M, plan et incliné à 45° sur l'axe. L'image de la fente, F′, est reprise par une lentille O_2 de 5 dioptries et située à 75 cm du point d'intersection M du miroir et de l'axe. Cette lentille donne de F une image réelle F″, que l'on reçoit sur un écran E.

1° A quelle distance de la seconde lentille O_2, doit-on placer l'écran?

Au point F′ on place alors l'extrémité d'un prisme d'indice égal à $\sqrt{2}$ et dont l'angle au sommet est de 30°.

2° De combien faudra-t-il faire tourner la seconde partie de la figure pour continuer à recevoir convenablement l'image finale et quel sera l'aspect de celle-ci?

(Bacc. Istanbul.)

380. — On utilise comme loupe une lentille mince ayant la forme d'un ménisque convergent, dont les rayons de courbure sont 2,5 cm et 5 cm. L'indice vaut 1,5.

1° Déterminer la position d'un petit objet observé pour que l'image soit : *a*) Rejetée à l'infini; — *b*) Située à 30 cm de la lentille.

2° L'œil de l'observateur étant à 2 cm derrière la loupe, calculer, en dioptries, la puissance de l'instrument dans l'un et l'autre cas.

(Bacc. Toulouse.)

381. — 1° On forme l'image d'un disque lumineux sur un écran au moyen d'une lentille convergente de 20 cm de distance focale. La distance du disque à la lentille est 20 m et son diamètre est 20 cm. Quelle devra être la distance de l'écran à la lentille pour que l'image soit nette? Quel sera le diamètre de l'image?

2° On interpose entre l'écran et la lentille une lame de verre à faces planes et parallèles, d'épaisseur 1,5 cm et d'indice 1,5. De combien devra-t-on déplacer l'écran, et dans quel sens, pour que l'image reste nette? Tracer la marche des rayons.

3° Au lieu de déplacer l'écran, on peut rendre sa netteté à l'image en accolant à la lentille une deuxième lentille. Cette deuxième lentille devra-t-elle être convergente ou divergente? Quelle devra être sa distance focale?

(Bacc. Clermont.)

382. — On fait arriver parallèlement à l'axe d'une lentille convergente de 10 cm de diamètre un faisceau cylindrique de rayons lumineux de même axe et de même diamètre. Le faisceau convergent sortant de la lentille a une section ayant un diamètre de 0,03 m à 0,84 m de la lentille.

Au foyer principal de cette lentille convergente on place, perpendiculairement à l'axe, un objet lumineux de hauteur égale à 0,04 m. On demande la grandeur de l'image de cet objet par rapport à une lentille divergente ayant même axe que la lentille convergente et située du côté du foyer image de cette lentille; la distance focale de la lentille divergente est égale à 0,60 m; les lentilles sont à 1,60 m l'une de l'autre. *(Bacc. Lille.)*

383. — 1° On donne une lentille convergente L_1 de distance focale $f_1 = 50$ cm. Trouver la position et la grandeur de l'image A_1B_1 donnée par cette lentille d'un objet rectiligne AB, très éloigné, de diamètre apparent $0 = \frac{1}{10}$ de radian.

2° Entre L_1 et A_1B_1 on interpose une lentille divergente L_2, de distance focale $f_2 = 15$ cm; la distance des deux lentilles L_1L_2 est égale à 38 cm. La lentille L_2 donne de A_1B_1 une image A_2B_2 : construire la marche d'un pinceau de rayons à travers le système et calculer la position et la grandeur de A_2B_2.

3° Quelle serait la distance focale d'une lentille L_3 convergente, qui donnerait de AB une image A_3B_3 de même dimension que l'image A_2B_2 donnée par le système de deux lentilles précédent? Montrer que l'encombrement du système L_1L_2 est moindre que l'encombrement du système L_3 (on appelle encombrement la distance de L_1 à A_2B_2 pour le premier système de L_3 à A_3B_3 pour le second).

(Bacc. Montpellier.)

384. — 1° Quel est le diamètre de l'image du Soleil donnée sur un écran par une lentille convergente de 20 cm de distance focale? On donne le diamètre apparent du Soleil : 32′.

2° L'image du Soleil ayant d'abord été mise au point sur l'écran, on veut obtenir sur cet écran, sans déplacer la lentille, l'image d'un objet de 15 cm de hauteur placé à 2 m de la lentille du même côté que le Soleil. Dans quel sens et de combien faut-il déplacer l'écran pour cette nouvelle mise au point? Quelle est la hauteur de l'image?

3° La surface de la lentille est limitée par un diaphragme circulaire dont le centre est sur l'axe de la lentille et dont le diamètre d'ouverture est 1 cm. L'écran reste dans la position finale de l'expérience précédente. Un point lumineux est alors placé sur l'axe de la lentille, à une distance p de celle-ci, du côté opposé à l'écran. Il donne sur cet écran une tache circulaire de 1 mm de diamètre. Quelle est la distance p? Quel diamètre maximum faudrait-il donner à l'ouverture du diaphragme pour que cette tache n'ait plus que 0,2 mm de diamètre?

(1re C. M. Buenos-Aires 1953.)

385. — 1° On dispose d'une lentille convergente mince, L_1, dont on mesure la distance focale; on trouve $f_1 = 18{,}75$ cm. Citer quelques méthodes pouvant servir à cette détermination. Sera-t-il facile d'atteindre la précision que comporte la donnée?

2° On accole à la lentille L_1 une lentille divergente, L_2, dont on voudrait déterminer la distance focale, f_2.

Dans ce but, on utilise un objet lumineux et un écran situés à une distance D l'un de l'autre. Pour deux positions du système L_1L_2, on obtient sur l'écran une image nette de l'objet et l'on constate que ces deux positions sont séparées par une distance *d*. Montrer que la connaissance de D et *d* permet de calculer la distance focale, *f*, de l'ensemble L_1L_2, puis celle de L_2. A quelle condition doivent satisfaire *f* et D pour que la mesure soit possible? Quelle précision peut-on obtenir? Décrire l'objet lumineux qu'il convient d'employer; décrire et dessiner le montage de cette manipulation.

Application numérique : D = 200,0 cm; *d* = 105,0 cm.

(I[re] *C'. M'.* 1955.)

386. — On veut obtenir sur un écran une image du soleil aussi grande que possible:

1° en utilisant une seule lentille. Expliquez comment vous la choisirez et comment vous ferez les mesures nécessaires à la détermination du diamètre apparent du soleil avec le plus de précision possible.

Application. — Distance focale de la lentille : 200 cm; diamètre de l'image du soleil : 1,92 cm.

2° En utilisant deux lentilles placées à la suite l'une de l'autre et possédant le même axe principal. La première est une lentille convergente et sa distance focale est 25 cm; la deuxième est divergente et sa distance focale est 5 cm.

Quelle distance doit séparer les centres optiques des deux lentilles pour que l'image du soleil reçue sur un écran placé après la deuxième lentille ait le même diamètre que dans la première question?

Quelle distance séparera l'écran de la première lentille?

Quel avantage présente ce dispositif par rapport au premier?

3° Voyez-vous comment on pourrait mesurer la distance focale de la lentille divergente en utilisant le soleil et la lentille convergente?

(*Bacc.* I[re] *C'. M'. Septembre* 1956.)

387. — Un objet AB = 2 cm est placé devant une lentille convergente L perpendiculairement à son axe principal; il donne une image réelle et égale à l'objet sur un écran E placé à 80 cm de l'objet.

1° Calculer la distance focale et la convergence de la lentille L.

2° L'objet AB est ensuite placé à 25 cm de la lentille L, toujours perpendiculairement à l'axe principal; il donne une image A'B' sur l'écran E convenablement disposé.

Déterminer la position et la grandeur de l'image; construire un faisceau de rayons issus de A.

3° Entre la lentille L et l'écran E, on dispose une lame à faces parallèles d'indice $n = 1{,}5$ et d'épaisseur $e = 6$ cm.

Dans quel sens se déplace l'image? Quelle sera la nouvelle position, E', de l'écran E par rapport à la lentille L?

4° La lame à faces parallèles est retirée, l'écran est dans la position E'. On place une lentille divergente, L', à 92 cm de L. Quelle devra être sa convergence pour obtenir à l'aide du système LL' une image nette sur l'écran E'? Calculer sa grandeur et construire un faisceau de rayons issus de A.

(I[re] *C. M. et Techn.* 1954.)

388. — A. — Un point lumineux A est placé à une distance D = 200 cm d'un miroir plan M. Entre A et M on déplace une lentille convergente mince L_1, de telle sorte que son centre optique O reste sur la perpendiculaire AH, abaissée de A sur M, l'axe optique de la lentille restant confondu avec AH.

La lumière issue de A traverse L_1, se réfléchit sur M, retraverse L_1 en sens inverse et forme une image définitive, A'. Cette image A' est confondue avec le point objet A pour deux positions de L_1 correspondant à des distances OH égales respectivement à 100 centimètres et 150 centimètres. Expliquer ces résultats et déterminer la distance focale, f_1, de la lentille L_1.

B. — On accole à cette lentille L_1 une lentille convergente mince, L_2, de distance focale $f_2 = 75$ centimètres, le centre optique, O', de l'ensemble étant situé entre A et H à 150 centimètres du miroir.

1° Où se forme l'image définitive A'?

2° Tracer la marche d'un faisceau de rayons lumineux issu de A et aboutissant à A'.

3° De combien et dans quel sens doit-on déplacer le miroir M parallèlement à lui-même pour que l'image définitive A' revienne coïncider avec A?

C. — L restant fixe, on déplace L_2 vers le miroir de façon que son centre optique coïncide avec le foyer image de L_1, le point objet A étant supposé à l'infini dans la direction de l'axe commun des deux lentilles.

On demande où se forme l'image définitive A' de A dans le système ainsi transformé.

(Alger 1954.)

389. — Pour agrandir une photographie, on l'éclaire convenablement et on la plac- perpendiculairement à l'axe principal d'une lentille convergente L de 10 cm de dise tance focale. Cette lentille donne de la photographie une image sur un écran E, remplacé ultérieurement par une plaque photographique.

Soient A et B deux points de cette photographie, A' et B' leurs images sur l'écran. On désignera par γ le grandissement $\frac{A'B'}{AB}$ et par d la distance de la photographie à l'écran.

1° Pour une valeur fixe de d il existe en général deux positions de la lentille L pour lesquelles on obtient une image nette sur l'écran.

a) Calculer en fonction de d les valeurs correspondantes de γ, que l'on désignera par γ_1 et γ_2.

b) Quelle est la relation entre γ_1 et γ_2?

c) Montrer que, seule, l'une des valeurs est utilisable dans le but proposé.

2° Pour que la lentille L puisse donner de AB une image nette sur l'écran, il faut que d soit égale ou supérieure à une certaine valeur, d_0, que l'on calculera.

3° Calculer d pour qu'on ait la relation $\gamma_1 = 4\gamma_2$.

4° On règle d de façon à avoir $\gamma_1 = \gamma_2$. Puis on accolle à la lentille L une lentille L'. En déplaçant ce système entre AB et l'écran, on constate qu'il existe deux positions pour lesquelles on obtient une image nette sur l'écran E. Pour l'une des positions on obtient de AB une image A'B' = 2 cm. Pour la deuxième position on obtient une image A"B" = 18 cm. Calculer la distance focale de L'.

(1re C. M. et Techn. Liban 1954.)

390. — 1° On dispose d'une lentille, L_1, de convergence — 4 dioptries, dont l'axe est horizontal. Un objet vertical de 10 m de hauteur est situé à 1 km. Calculer la grandeur de l'image. Marche d'un faisceau issu de l'extrémité de l'objet, l'autre extrémité étant située sur l'axe.

2° On place derrière L_1, une lentille convergente, L_2, de 1 dioptrie. Les deux lentilles étant distantes de 1,25 m, déterminer, par le calcul, la position, la nature, la grandeur et le sens de l'image de l'objet fournie par le système. Construction.

3° Même question en supposant que la lumière traverse d'abord la lentille L_2, puis la lentille L_1, les deux lentilles étant distantes de 70 cm. Quel est le système ainsi réalisé?

(1re C. M. Égypte 1954).

391. — I. — On réalise le montage représenté par le schéma ci-dessous (principe du microscope métallographique pour l'examen d'un échantillon métallique, M) *(fig. 331)*.

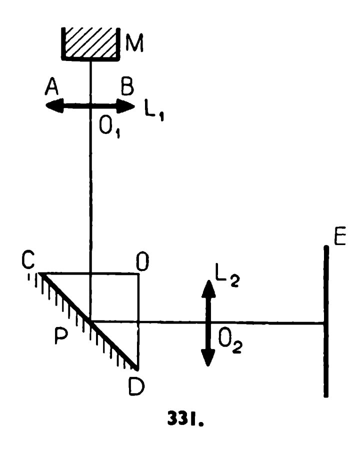
L_1 est une lentille convergente de 5 mm de distance focale dont le centre optique est à 5,5 mm de la surface polie de l'échantillon M examiné. A et B sont deux points de cette surface distants de 0,1 mm (A sur l'axe principal de L_1).

P est un prisme à réflexion totale d'indice de réfraction 1,5, dont les côtés de l'angle droit, OC et OD, mesurent 20 mm.

L_2 est une lentille convergente de 45 mm de distance focale.

Les axes principaux de L_1 et L_2 sont perpendiculaires aux faces OC et OD et se coupent en I, milieu de CD, et l'on a en outre

$$IO_1 = 80 \text{ mm}, \quad IO_2 = 35 \text{ mm}.$$



331.

E est une plaque photographique.

1° Déterminer la nature, la position et la grandeur de l'image A_1B_1 donnée par la lentille L_1.

2° On suppose d'abord que le prisme P se comporte comme un miroir plan placé en CD. On veut que le système L_1, P, L_2 donne de AB une image nette, A'B', sur la plaque E.

a) Déterminer la position de la plaque E par rapport à O_2.

b) En déduire le grandissement de l'appareil $\left(\text{c'est-à-dire le rapport } \frac{A'B'}{AB}\right)$ et tracer la marche d'un faisceau de lumière issu du point A.

3° On tient compte maintenant de la présence des dioptres plans OC et OD. De combien et dans quel sens faut-il déplacer la plaque E (par rapport à la position précédente) pour que l'image A'B' reste nette?

(*1re Techn. A. E. F., Cameroun, Maroc et Togo* 1954.)

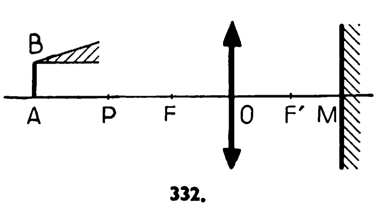
392. — Un miroir plan M est disposé normalement à l'axe OM d'une lentille convergente, L, de distance focale OF = f et de centre optique O. La surface réfléchissante de M est dirigée vers L et la distance OM est prise égale à $2f$. Les rayons lumineux traversent L, se réfléchissent sur M et traversent de nouveau L (*fig. 332*).

1° Construire géométriquement, sans l'aide des formules, la marche des trois rayons suivants :

a) rayon issu du foyer objet F;

b) rayon issu du point P, symétrique de M par rapport à O (OP = $2f$).

c) rayon parallèle à l'axe. L'émergent correspondant coupe l'axe au point φ. Déterminer Oφ en utilisant la construction géométrique d'un émergent correspondant à un incident donné.



332.

2° Construire géométriquement l'image A'B' d'un objet AB, linéaire et perpendiculaire à l'axe à la distance OA = $3f$, à l'aide des rayons issus de B et étudiés au 1° ainsi que du rayon Bφ.

3° On fait tourner d'un angle α le miroir autour du point M. L'image A'B' varie en grandeur et position. Pour quelle valeur de α aura-t-on A'B' = AB?

(*1re M. Athènes* 1954.)

393. — *1re partie.* — On veut déterminer graphiquement la distance focale d'une lentille convergente L. On utilise pour cela un banc d'optique sur lequel on peut repérer, à l'aide d'une règle graduée en millimètres, les positions de la lentille L, d'une flèche lumineuse AB (perpendiculaire à la règle graduée) et d'un écran E sur lequel on formera l'image A'B' de AB à l'aide de la lentille L.

a) Donner le schéma du montage ainsi réalisé.

b) On fait alors trois expériences qui donnent les résultats suivants :

Distances p de la lentille à AB : 133 mm, 149 mm, 499 mm.

Distances p' de la lentille à A'B' : 400 mm, 300 mm, 125 mm.

On calcule ensuite les valeurs numériques successives de $\frac{1}{p}$ et de $\frac{1}{p'}$, les longueurs p et p' étant maintenant exprimées en mètre.

c) On porte sur deux axes rectangulaires, en abscisses, les valeurs de $\frac{1}{p}$ et en ordonnées les valeurs de $\frac{1}{p'}$. On obtient ainsi trois points situés sur une même droite. Justifier ce résultat et déterminer à l'aide de cette droite la distance focale cherchée. Écrire l'équation de la droite.

2e *partie.* — 1° On construit un appareil photographique en prenant la lentille L comme objectif. Quelle sera la grandeur de l'image sur la plaque sensible d'une maison MN de 20 m de hauteur et située à 400 m de l'appareil ?

2° Cette image étant estimée de dimensions trop faibles, on désire obtenir une image quatre fois plus grande. Dans ce but, on construit un nouvel appareil en prenant comme objectif la lentille L et une lentille L′ divergente, disposée à 7 cm derrière la première lentille (les axes optiques des deux lentilles sont confondus). Quelle sera la distance de la plaque à la lentille L′ ? Quelle est la distance focale de cette lentille ? En déduire la longueur approximative de l'appareil ainsi réalisé.

3° Quelle serait la distance focale d'une lentille convergente qui, utilisée seule, donnerait de la maison observée une image de mêmes dimensions que l'image précédente ? Conclusion.

(Bacc. C′. M′.)

394. — Décrivez les expériences faites en classe ou en travaux pratiques, permettant de déterminer la distance focale d'une lentille convergente. Discutez la pécision d'une de ces mesures.

Derrière une lentille convergente mince de 20 cm de distance focale, on dispose un miroir plan perpendiculaire à son axe principal. Par quel point de cet axe doit passer un rayon lumineux incident pour que, après avoir traversé la lentille, s'être réfléchi sur le miroir et avoir traversé à nouveau la lentille, il repasse par le même point ? Ce résultat dépend-il de la position du miroir. Trouvez, par construction, l'image d'un petit segment passant par ce point et perpendiculaire à l'axe principal.

La lentille reçoit ensuite un faisceau de rayons parallèles à l'axe principal. Que deviennent les rayons émergeant du système dans les trois hypothèses suivantes :

a) la distance du miroir à la lentille est 25 cm.

b) cette distance est 15 cm.

c) cette distance est 20 cm.

(1re C′. et M′. 1954.)

ŒIL — INSTRUMENTS D'OPTIQUE

395 — 1° Une personne voit distinctement les objets qui sont à plus de 40 cm de ses yeux. Que deviennent pour cette personne les limites de la vision distincte lorsqu'elle regarde à travers des lunettes dont les verres, sphériques, ont une puissance de + 1 dioptrie ?

2° Les limites de la vision distincte pour une personne sont 11 cm et 101 cm. Que deviennent ces limites lorsque la personne utilise des lunettes dont les verres sphériques ont une puissance de — 1 dioptrie ?

(La distance de l'œil au centre optique du verre correspondant est dans les deux cas 1 cm.)

(Bacc. Besançon.)

396. — Un myope a pour distance du *punctum remotum* 31 cm, et pour distance du *punctum proximum* 11 cm.

1° Donner la distance focale des verres qu'il doit employer pour voir nettement sans accommoder à l'infini. (On supposera le centre optique de chaque œil à 1 cm derrière le centre optique du verre correspondant.)

2° Quel est le *punctum proximum* de ce myope muni de ces verres ? Pourra-t-il voir nettement sans discontinuer (avec le secours de ces verres quand cela sera nécessaire) un objet qui s'avancerait vers lui, depuis l'infini jusqu'à 11 cm de son œil ?

3° Soit a l'angle sous lequel un œil normal verrait un objet AB situé à l'infini. Soit a' l'angle sous lequel le myope le voit à travers ses verres, toujours placés à 1 cm devant ses yeux. Quelle est la valeur du rapport $\frac{a'}{a}$? (On confondra les angles exprimés en radians avec leurs tangentes.) *(Bacc. Poitiers.)*

397. — On constitue un microscope au moyen de deux lentilles convergentes minces, centrées sur le même axe, placées à 20 cm l'une de l'autre, et de 1 cm de distance focale chacune.

1° A quelle distance de la lentille (objectif) doit-on placer un petit objet pour que l'image finale, regardée par l'observateur, soit à l'infini?

2° Quel est, dans ce cas, le grandissement de l'objectif et la puissance du microscope?

3° De combien devrait-on modifier la position de l'objet pour un œil myope visant à 10 cm et placé au foyer image de l'oculaire?

(Bacc. Hanoï.)

398. — L'objectif d'un microscope a une distance focale f de 6 mm, l'oculaire de ce microscope a une distance focale f' de 24 mm, l'objet est à une distance a de 6,1 mm de l'objectif. 1° A quelle distance de l'objectif se formera l'image de l'objet? 2° Quel est le rapport des dimensions de cette image à celles de l'objet? 3° A quelle distance de cette image faut-il placer l'oculaire pour que la nouvelle image soit à la distance $d = 270$ mm de l'œil placé au foyer image de l'oculaire? 4° Quel est alors le grossissement total du microscope? 6° Quelle est sa longueur?

(Bacc. Nancy.)

399. — Une lentille convergente donne d'un petit objet placé à 22 mm de son centre optique une image réelle 10 fois plus grande. Quelle est en dioptries sa convergence? 2° On utilise cette lentille comme loupe. L'observateur place son œil au foyer image. Sous quel angle, en radians, verra-t-il l'image d'un objet rectiligne de 1 mm de hauteur?

3° La loupe précédente sert d'oculaire à un microscope dont l'objectif a une distance focale de 2 cm. Un objet lumineux de $\frac{1}{10}$ de millimètre est placé à 22 mm de l'objectif. La mise au point est faite de manière que l'image finale se forme à 27 cm de l'œil toujours supposé au foyer de l'oculaire.

a) Quelle sera la longueur de l'image finale observée?

b) Quelle sera la longueur de l'appareil (c'est-à-dire la distance entre les centres optiques de l'objectif et de l'oculaire)?

(Bacc. Paris.)

400. — 1° Deux lentille convergentes de 3 cm de distance focale sont disposées à 2 cm l'une de l'autre; elles ont même axe principal. Déterminer le point de convergence des rayons incidents parallèles à l'axe principal commun et traversant le système constitué par les deux lentilles. Que représente ce point de convergence?

2° Ce système de lentilles est utilisé comme loupe :

a) A quelle distance de la première lentille faut-il placer un petit objet réel pour que son image définitive virtuelle se forme à 25 cm de la deuxième lentille?

b) Représenter la marche d'un pinceau de rayons issus d'un point de l'objet.

c) Calculer le grossissement de cette loupe dans les conditions précédentes d'utilisation pour un observateur à vue normale, c'est-à-dire dont la distance minimum de vision distincte est 25 cm et dont l'œil est placé immédiatement derrière la deuxième lentille.

(1re C. M. Espagne et Portugal 1954.)

401. — Un œil qui a pour distance minimum de vision distincte 10 cm utilise, pour voir nettement à l'infini, sans accommodation, une lentille divergente de 100 cm de distance focale, supposée accolée à l'œil.

1° Quel est le défaut de vision de cet œil et quelle est sa distance maximum de vision distincte?

2° Trouver ce que devient sa distance minimum de vision distincte après correction.

3° Le même œil, sans lentille, examine un objet de 2 mm à l'aide d'une loupe de 25 dioptries. Les centres optiques de l'œil et de la loupe étant supposés confondus, quelles sont les positions extrêmes que peut occuper l'objet pour être vu nettement?

4° Quel est le plus grand angle possible sous lequel cet œil voit nettement l'image et quelle est alors la puissance de la loupe?

(Ire C. M. Madagascar 1954.)

402. — Un microscope est constitué par deux lentilles convergentes dont les distances focales sont respectivement 1 cm et 2 cm. Leur distance est 19 cm.

1° Comment sont-elles placées? L'appareil est utilisé par un observateur dont la vue est normale et la distance minimum de vision distincte, 20 cm. Calculer la puissance intrinsèque et le grossissement pour cet observateur.

2° L'acuité visuelle de l'observateur étant $\frac{3}{10\,000}$ radian, calculer la grandeur du plus petit objet vu à travers l'instrument (pouvoir séparateur) lorsque la mise au point est faite à l'infini.

3° Calculer la latitude de mise au point de l'instrument, sachant que l'observateur place son œil dans le plan focal image de l'oculaire. La donner avec deux chiffres significatifs.

4° Quel déplacement doit-on donner à l'instrument, à partir de la position de mise au point à l'infini, pour obtenir une image réelle sur un écran situé à 1 m en arrière de l'oculaire?

(Ire C. M. et Techn. Montréal 1954.)

403. — 1° Les limites de vision distincte d'un œil jeune sont 8,5 cm et 21 cm, ces distances étant comptées à partir de son centre optique. Quel est le défaut de cet œil?

Pour lui permettre de voir à l'infini sans accommoder, on lui adjoint une lentille mince, L_1, dont le centre optique est à 1 cm de celui de l'œil. Quelles sont la nature, la distance focale et la convergence de cette lentille? Quelle est la distance minimum de vision distincte de l'œil muni de ce verre correcteur?

2° La faculté d'accommodation de cet œil diminue lorsqu'il vieillit et les limites de vision distincte de l'œil nu sont ramenées à 16 cm et 21 cm. Quelles sont alors les limites de vision distincte de l'œil corrigé par la lentille L_1?

3° Pour permettre à l'œil vieilli de lire, sans enlever le verre correcteur L_1 et sans accommoder, un texte situé à 31 cm de son centre optique, on lui adjoint une deuxième lentille, L_2, centrée sur le même axe que L_1.

a) Quelle doit être la distance focale de L_2 si cette lentille est accolée à L_1, leurs centres optiques étant supposés confondus?

b) Où doit être placée L_2 si c'est une loupe de puissance intrinsèque 10 dioptries?

(Indochine Ire M. 1954.)

404. — 1° Un myope a son punctum remotum à 25 cm; quand il accommode, la convergence de l'œil augmente de 4 dioptries. Quel est son punctum proximum? Quelle lentille doit-il utiliser pour corriger sa vue?

2° Ce myope utilise une loupe de 40 dioptries. Quelle est la latitude de mise au point de cette loupe si l'œil est placé au foyer de cette loupe?

3° Quelle est la puissance de la loupe si le myope accommode au maximum et si l'œil est placé tout près de la loupe?

4° Quelle est, dans ces conditions et pour cet observateur, le grossissement de la loupe?

(Ire C. M. Brésil 1954.)

405. — 1° Une division micrométrique est formée de traits parallèles, équidistants, écartés de un centième de millimètre. Peut-on séparer ces traits à l'œil nu? On prendra pour la distance minimum de vision distincte de l'observateur 25 cm et pour le pouvoir séparateur de l'œil trois dix-millièmes de radian.

Quel est le grossissement minimum du microscope qui permet d'apprécier le dixième de division de la précédente graduation (c'est-à-dire le micron)?

Quelle est la puissance correspondante de ce microscope?

2° L'oculaire d'un tel microscope a une distance focale de 4 cm. On demande quel est le grandissement de l'objectif et quelle est la distance focale de ce dernier, sachant que la longueur du microscope (distance séparant l'objectif de l'oculaire) est de 196 mm. On supposera que l'œil observe l'image à l'infini.

3° En déplaçant convenablement l'oculaire par rapport à l'objectif, on forme, sur un écran placé à 50 cm en arrière de l'oculaire, une image réelle de la graduation. Dans quel sens et de combien faut-il déplacer l'oculaire pour obtenir ce résultat?

(Bacc. Aix-Marseille.)

406. — Un microscope est formé d'un objectif de 5 mm et d'un oculaire de 20 mm de distances focales, dont les axes optiques coïncident et dont les centres optiques sont distants de 20 cm. L'œil est placé au foyer image de l'oculaire.

1° Calculer la position de l'objet quand l'œil, qui est normal, n'accommode pas. Quels sont alors la puissance et le grossissement de l'appareil?

2° Calculer la position de l'objet quand l'œil accommode au maximum, sa distance minimum de vision distincte étant 25 cm. Quelle est, avec deux chiffres significatifs exacts, la latitude de mise au point? Calculer dans ce cas la puissance et le grossissement du microscope.

Faire dans les deux cas des dessins corrects et soignés.

(Bacc. Paris.)

407. — Une lunette astronomique est constituée par un objectif et un oculaire ayant respectivement 50 cm et 2 cm de distance focale.

1° Calculer le grossissement de la lunette, dans le cas où elle est réglée par un observateur à vue normale pour observer sans accommoder un objet très éloigné.

2° A quelle distance minima de l'objectif sont situés les objets que l'observateur peut voir nettement sans modifier le tirage de la lunette? L'œil est supposé placé au foyer image de l'oculaire; sa distance minima de vision distincte est de 20 cm.

3° L'oculaire pouvant se déplacer de 5 cm dans les deux sens par rapport à l'objectif, à partir de la position initiale, à quelle distance minima seront les objets que l'observateur pourra voir nettement en modifiant le tirage : *a*) sans accommoder; *b*) en accommodant?

(Bacc. Caen.)

408. — L'objectif d'une lunette astronomique a 50 cm de distance focale. La puissance de l'oculaire est de 50 dioptries. Un œil normal l'utilise pour examiner sans effort d'accommodation deux étoiles A et B séparées par une distance angulaire de $\frac{1}{10}$ de minute (angle AOB, O étant un point quelconque placé sur la terre). On demande :

1° le grossissement, la longueur de la lunette et la construction de l'image, en supposant l'axe de la lunette dirigé vers A;

2° la grandeur de l'image intermédiaire donnée par l'objectif; l'angle sous lequel on voit ces deux étoiles à travers la lunette.

3° Pour que cet œil puisse voir distinctement deux objets il faut que leur distance angulaire soit supérieure à 1 minute (pouvoir séparateur). On demande si cet œil peut distinguer ces deux étoiles à l'œil nu et à travers la lunette. Calculer la plus petite distance angulaire de deux étoiles qui peuvent être vues distinctes à travers la lunette.

4° Un myope regarde à travers cette lunette en accommodant à son minimum de vision distincte, qui est 10 cm. De combien doit-il modifier le tirage de la lunette et de combien varie le grossissement effectif? Cette variation est-elle importante? Faire la nouvelle construction de l'image.

On suppose l'œil placé au foyer de l'oculaire.

(Bacc. Athènes.)

409. — 1° L'objectif d'une lunette astronomique a 360 cm de distance focale. Calculer, en dioptries, la puissance de l'oculaire, sachant que l'appareil fait voir, sous un angle de 1′48″, deux étoiles séparées par un angle de 0,5 seconde.

2° On dispose devant l'objectif un prisme de petit angle A (indice de réfraction du verre du prisme : 1,50), de manière que son plan bissecteur soit approximativement perpendiculaire à l'axe de la lunette et que son arête passe par cet axe. On pointe une étoile avec la lunette; montrer que l'observateur voit ainsi deux images. Calculer l'angle A du prisme, sachant qu'il les voit sous un angle de 27′.

(Bacc. Poitiers.)

410. — Avec deux lentilles, L et L′, on fait deux expériences :

1° L et L′, étant juxtaposées, donnent d'un objet réel situé à 12 cm une image réelle située à 9,6 cm.

2° On forme avec L et L′ une lunette astronomique qu'un observateur, dont l'œil est normal et sans accommodation, règle pour la vision à l'infini. Puis, l'objectif L étant tourné pendant le jour vers le ciel éclairé, on marque sur cette lentille deux points distants de 32 mm. Un écran convenablement placé de l'autre côté de l'oculaire L reçoit une image de l'objectif sur laquelle les images des deux points sont distantes de 4 mm.

Expliquer ces expériences et en déduire les distances focales f et f' des deux lentilles L et L′ supposées infiniment minces.

(Bacc. Grenoble.)

411. — Pour mesurer la distance de deux points éloignés A et B d'un sol horizontal, on fixe verticalement en B une règle portant deux repères R_0 et R écartés exactement de 2 m, qu'on vise avec une petite lunette astronomique placée en A; la distance focale de l'objectif est 80 mm, celle de l'oculaire 16 mm. Dans le plan focal de l'objectif est une lame de verre portant une graduation verticale dont on fait coïncider le zéro avec l'image de R_0; le nombre inscrit en face de l'image de R est alors la mesure de x en mètres.

1° A quelle distance y du zéro se trouvent les traits de la graduation correspondant aux distances 20 m, 50 m, 100 m, 200 m?

Représenter graphiquement la fonction $y = f(x)$.

2° A l'œil nu, on ne peut distinguer deux traits placés au *punctum proximum* commercial (à 250 mm de l'œil) s'ils sont écartés de moins de 0,1 mm. De même, quand on croit avoir établi la coïncidence entre l'image d'un des repères et l'un des traits de la règle il peut subsister entre l'image et le trait une petite distance; calculer la valeur maxima α de cette distance.

3° En utilisant le graphique établi, déduire de la valeur de α le maximum de l'erreur qui en résulte dans la connaissance de x. Montrer que la méthode n'est précise que pour des distances suffisamment faibles.

(Bacc. Alger.)

412. — On donne une lentille convergente L_1 de $+4$ dioptries et une lentille divergente L_2 de -20 dioptries; les deux lentilles sont centrées sur le même axe à 20 cm l'une de l'autre.

1° Tracer la marche à travers ce système d'un rayon lumineux parallèle à l'axe et tombant sur la lentille convergente.

2° Un faisceau de rayons parallèles entre eux en faisant avec l'axe un angle α tombe sur la lentille convergente :

a) Tracer la marche du faisceau à travers le système.

b) Calculer numériquement l'angle α' que fait avec l'axe la direction du faisceau émergent pour $\alpha = 1°$.

c) Montrer que le grandissement du système est indépendant de la position de l'objet, et calculer sa valeur.

3° Ayant porté à 21 cm la distance qui sépare les lentilles, l'axe est braqué vers le centre d'un astre dont le diamètre apparent est 0,5 degré; la lentille conver-

gente étant tournée vers la lumière incidente, on obtient une image réelle sur un écran placé en arrière de la lentille divergente.

Calculer la position et le diamètre de cette image.

(Bacc. Montpellier.)

413. — Un instrument d'optique destiné à l'observation des objets situés à courte distance est formé, comme une lunette astronomique, d'un objectif dont la distance focale mesure 20 cm et d'un oculaire dont la convergence est + 20 dioptries; les deux lentilles, d'épaisseur négligeable, sont centrées sur le même axe; leur distance peut être réglée à volonté.

Dans tout ce qui suit, on supposera que l'œil de l'observateur vise à l'infini.

1° L'observateur regarde au travers de l'instrument une échelle graduée plane perpendiculaire à l'axe située à 1 m de l'objectif; comment l'observateur devra-t-il placer l'oculaire par rapport à l'objectif pour voir nettement l'échelle? (On calculera la distance des deux lentilles.)

2° L'échelle est graduée en centimètres; quel est en degrés et minutes l'angle sous lequel une division est vue à travers l'instrument?

3° L'objet est placé à 45 cm de l'objectif; dans quel sens et de combien l'observateur doit-il déplacer l'oculaire à partir de sa position initiale pour voir nettement l'objet? Indiquer un usage possible de l'instrument.

4° L'objet est un point lumineux A situé sur l'axe à 45 cm de l'objectif, l'instrument est réglé pour la vision nette à cette distance; à 7,5 cm en arrière de A par rapport à l'instrument on dispose un miroir plan perpendiculaire à l'axe de l'instrument.

a) Dans quel sens et de combien l'observateur doit-il déplacer l'oculaire — sans déplacer l'instrument — pour apercevoir une nouvelle image nette de A?

b) L'observateur pourrait-il obtenir le même résultat (c'est-à-dire observer une image nette de A) en déplaçant l'instrument tout entier sans modifier la distance de l'oculaire à l'objectif?

(Bacc. Clermont.)

414. — 1° La distance focale d'une loupe est 2 cm.

Faire un schéma montrant comment la loupe doit être utilisée par un observateur à vue normale dont l'œil n'accommode pas.

Quelle est alors la puissance de la loupe et quel est son grossissement, la distance minima de vision distincte de l'observateur étant 20 cm?

2° L'œil étant placé au foyer image, où faut-il placer l'objet pour que l'image se forme à la distance minima de vision distincte?

3° On associe la loupe à une lentille convergente de distance focale 1 m de façon à former une lunette astronomique.

Comment faut-il les disposer pour observer un astre sans accommoder? Quel est alors le grossissement?

4° L'axe de l'appareil est dirigé vers le centre d'un astre dont le diamètre apparent est 6 minutes.

Quelle est la grandeur de l'image donnée par l'objectif?

Quel est l'angle sous laquel l'astre est vu par l'observateur, sans accommoder?

5° Une plaque photographique est placée à 20 cm derrière l'oculaire. De combien et dans quel sens faut-il déplacer l'ensemble oculaire plaque pour obtenir sur la plaque une image nette de l'astre? Quel est le diamètre de cette image?

(1re C. M. Istanbul 1954.)

415. — Une lunette astronomique est formée de deux lentilles infiniment minces centrées sur le même axe : l'objectif de convergence 0,75 dioptrie et un oculaire de 4 cm de distance focale.

1° Calculer la longueur de la lunette supposée afocale.

2° Déterminer son grossissement dans les conditions précédentes.

3° Un œil myope utilise cette lunette. Dans quel sens doit-il déplacer l'oculaire pour mettre au point sans accommoder sur un objet à l'infini, sachant que sa distance

maximum de vision distincte est de 25 cm. Quelle est alors la longueur de la lunette?

4° On enlève l'oculaire et, dans le plan focal image de l'objectif, on place un écran. Quelle est la dimension de l'image du soleil sur cet écran? Diamètre apparent du soleil : 32′.

5° On intercale entre l'objectif et l'écran une lentille divergente de 25 cm de distance focale et située à 20 cm du foyer image de l'objectif. Trouver la position et la grandeur de l'image du soleil donnée par cet ensemble.

416. — Une lentille convergente L est éclairée en lumière jaune par une fente rectangulaire F de largeur AB = 1 mm, normale à son axe et dont le centre C est sur cet axe. Elle envoie un faisceau de rayons parallèles sur l'objectif MN d'une petite lunette astronomique centrée sur le même axe et réglée pour la vision à l'infini. L'œil de l'observateur est dans le plan de l'image M′N′ que l'oculaire de la lunette donne de son objectif MN.

1° Déterminer la position et la grandeur de M′N′. Tracer la marche d'un faisceau de rayons issus du centre C de la fente.

2° Déterminer en position et en grandeur l'image A′B′ de la largeur AB de la fente donnée par le système « lentille L-objectif MN ». Tracer la marche d'un faisceau de rayons depuis le bord A de la fente situé à 0,5 mm au-dessus de l'axe jusqu'à l'œil.

3° Entre la lentille L et la lunette on dispose, au minimum de déviation, un prisme en verre d'indice $n = 1{,}532$ pour le jaune, dont la section principale est un triangle équilatéral. De quel angle doit tourner l'axe de la lunette pour que l'œil puisse observer de nouveau l'image de la fente? Marche des rayons issus de C à travers le système lentille-prisme-lunette.

4° La fente F est éclairée par une source de lumière blanche. Que devient la marche des rayons issus de C à travers le système lentille-prisme-objectif MN? A la sortie du prisme, l'angle que font entre elles les directions des rayons rouges et violets est égal à $\frac{3}{2}$ degré. Calculer l'angle sous lequel l'œil voit ce spectre.

Données numériques :

Lentille L : distance focale = 15 cm;

Lunette astronomique. — Objectif : MN = 4 cm; distance focale F = 20 cm; convergence de l'oculaire : 20 dioptries.

α	46°	47°	48°	49°	50°	51°	52°
$\sin\alpha$	0,720	0,731	0,743	0,755	0,766	0,777	0,788

Pour faire les figures on pourra supposer que la distance qui sépare L de M est égale à 10 cm.

(Bacc. Paris.)

417. — 1° A 6 cm devant une lentille convergente se trouve un petit objet, AB, perpendiculaire à l'axe. La hauteur de l'objet est 1 mm et la distance focale de la lentille 4 cm. Déterminer la position et la grandeur de l'image.

2° A la suite de la lentille convergente et dans le sens de la marche de la lumière, on place une lentille divergente dont la distance focale est 4 cm. Où faut-il la mettre pour que l'image finale soit rejetée à l'infini? Faire dans ce cas une figure indiquant la marche d'un faisceau de lumière issu d'un point de l'objet.

Calculer l'angle sous lequel l'objet est vu à travers l'appareil. Donner la définition de la puissance d'un instrument d'optique, en général, et calculer la puissance de l'instrument dans le cas précédent.

3° De combien faut-il déplacer l'objet AB et dans quel sens pour que l'image finale virtuelle se forme à 20 cm de l'œil de l'observateur placé contre la lentille divergente?

Calculer la puissance de l'instrument dans ce cas.

(1re M. Istanbul 1955.)

SINUS ET TANGENTES DES ANGLES.
CONVERSION DES DEGRÉS (D) EN RADIANS (RD).

D.	Rd.	Sin.	Tg.	Cotg.	Cos.		
0	0,0000	0,0000	0,0000	∞	1,0000	1,5708	**90**
1	0,0175	0,0175	0,0175	57,29	0,9998	1,5533	89
2	0,0349	0,0349	0,0349	28,64	0,9994	1,5359	88
3	0,0524	0,0523	0,0524	19,02	0,9986	1,5184	87
4	0,0698	0,0698	0,0699	14,30	0,9976	1,5010	86
5	0,0873	0,0872	0,0875	11,43	0,9962	1,4835	**85**
6	0,1047	0,1045	0,1051	9,514	0,9945	1,4661	84
7	0,1222	0,1219	0,1228	8,144	0,9925	1,4486	83
8	0,1396	0,1392	0,1405	7,115	0,9903	1,4312	82
9	0,1571	0,1564	0,1584	6,314	0,9877	1,4137	81
10	0,1745	0,1736	0,1763	5,671	0,9848	1,3963	**80**
11	0,1920	0,1908	0,1944	5,145	0,9816	1,3788	79
12	0,2094	0,2079	0,2126	4,705	0,9781	1,3614	78
13	0,2269	0,2250	0,2309	4,331	0,9744	1,3439	77
14	0,2443	0,2419	0,2493	4,011	0,9703	1,3265	76
15	0,2618	0,2588	0,2679	3,732	0,9659	1,3090	**75**
16	0,2793	0,2756	0,2667	3,487	0,9613	1,2915	74
17	0,2967	0,2924	0,3057	3,271	0,9563	1,2741	73
18	0,3142	0,3090	0,3249	3,078	0,9511	1,2566	72
19	0,3316	0,3256	0,3443	2,904	0,9455	1,2392	71
20	0,3491	0,3420	0,3640	2,747	0,9397	1,2217	**70**
21	0,3665	0,3584	0,3839	2,605	0,9336	1,2043	69
22	0,3840	0,3746	0,4040	2,475	0,9272	1,1868	68
23	0,4014	0,3907	0,4245	2,356	0,9205	1,1694	67
24	0,4189	0,4067	0,4452	2,246	0,9135	1,1519	66
25	0,4363	0,4226	0,4663	2,144	0,9063	1,1345	**75**
26	0,4538	0,4384	0,4877	2,050	0,8988	1,1170	64
27	0,4712	0,4540	0,5095	1,963	0,8910	1,0996	63
28	0,4887	0,4695	0,5317	1,881	0,8829	1,0821	62
29	0,5061	0,4848	0,5543	1,804	0,8746	1,0647	61
30	0,5236	0,5000	0,5773	1,732	0,8660	1,0472	**60**
31	0,5411	0,5150	0,6009	1,664	0,8572	1,0297	59
32	0,5585	0,5299	0,6249	1,600	0,8480	1,0123	58
33	0,5760	0,5446	0,6494	1,540	0,8387	0,9948	57
34	0,5934	0,5592	0,6745	1,483	0,8290	0,9774	56
35	0,6109	0,5736	0,7002	1,428	0,8192	0,9599	**55**
36	0,6283	0,5878	0,7265	1,376	0,8090	0,9425	54
37	0,6458	0,6018	0,7536	1,327	0,7986	0,9250	53
38	0,6632	0,6157	0,7813	1,280	0,7880	0,9076	52
39	0,6807	0,6293	0,8098	1,235	0,7771	0,8901	51
40	0,6981	0,6428	0,8391	1,192	0,7660	0,8727	**50**
41	0,7156	0,6561	0,8693	1,150	0,7547	0,8552	**49**
42	0,7330	0,6691	0,9004	1,111	0,7431	0,8378	48
43	0,7505	0,6820	0,9325	1,072	0,7314	0,8203	47
44	0,7679	0,6947	0,9657	1,036	0,7193	0,8029	46
45	0,7854	0,7071	1,0000	1,000	0,7071	0,7854	**45**
		Cos.	Cotg.	Tg.	Sin.	Rd.	D.

Si l'on veut calculer une valeur comprise entre deux nombres entiers de degrés, on admettra que, dans cet intervalle, la variation de la quantité cherchée est proportionnelle à la variation de l'angle.

TABLE

I. ÉLECTRICITÉ

II. MAGNÉTISME

III. ÉLECTROMAGNÉTISME

IV. OPTIQUE

mprimé en France par BRODARD-TAUPIN, Imprimeur-Relieur, Coulommiers-Paris.
55644-III-2-2249. Dépôt légal : n° 1544 le 1er trim. 1960.